

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLAUDIMIR JOSÉ REBEYKA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EMBUTIMENTO NO
RETORNO ELÁSTICO EM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

**CURITIBA
2017**

CLAUDIMIR JOSÉ REBEYKA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EMBUTIMENTO NO
RETORNO ELÁSTICO EM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, no Curso de doutorado em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes

Co-orientador: Sérgio Fernando Lajarin

**CURITIBA
2017**

R289i

Rebeyka, Claudimir Jose

Influência da temperatura de embutimento no retorno elástico em aços de alta resistência / Claudimir José Rebeyka – Curitiba, 2017.
119 p. : il. Color. ; 30 cm.

Tese – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes

Co-orientador: Sérgio Fernando Lajarin

Bibliografia: p.114-119.

1. Aços de alta resistência. 2. Propriedades mecânicas. 3. Embutimento. 4. Retorno elástico. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III. Lajarin, Sérgio Fernando. IV. Título.

CDD: 620.1

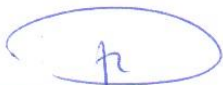


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA
Código CAPES: 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **CLAUDIMIR JOSE REBEYKA**, intitulada: **"INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE EMBUTIMENTO NO RETORNO ELÁSTICO EM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA"**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

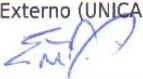
Curitiba, 15 de Fevereiro de 2017.


PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


LUIZ MAURICIO VALENTE TIGRINHO
Avaliador Externo (IFPR)


RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES
Avaliador Interno (UFPR)


SERGIO TONINI BUTTON
Avaliador Externo (UNICAMP)


EDUARDO MAURO DO NASCIMENTO
Avaliador Externo (UTFPR)

AGRADECIMENTOS

- Ao Deus criador da vida e de todas as coisas, pois sem Ele qualquer trabalho seria impossível;
- Ao Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes pela orientação deste trabalho;
- Ao Prof. Sérgio Fernando Lajarin pela co-orientação, apoio e suporte sobretudo nos experimentos de simulação numérica;
- Ao Prof. Sérgio Tonini Button, da UNICAMP, pelo extraordinário auxílio no desenvolvimento do trabalho;
- Ao Laboratório Multiusuários de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (Processo FAPESP 09/54138-8) pelo suporte e realização dos ensaios de tração à quente;
- À empresa Arcelor Mittal pelo fornecimento dos materiais HSLA350/440 e DP350/600 utilizados no estudo;
- À minha esposa Mariane Forbeci Rebeyka pelo apoio e incentivo;
- À minha filha Julia Forbeci Rebeyka;
- Ao Nikolas Woellner e Márcio Madi, meus companheiros de estudo;
- A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos;
- Dedico este trabalho a meu pai, Damiano Rebeyka (*in memoriam*), meu principal exemplo de trabalho, dedicação e honestidade.

RESUMO

A substituição dos aços convencionais por aços de alta resistência é uma aposta da indústria automotiva para fabricação de peças embutidas. Isto possibilita o uso de chapas mais finas com a manutenção das propriedades mecânicas e pode ser associada à redução do peso de componentes e redução de custos. Porém, o uso dos aços de alta resistência implica no agravamento de alguns problemas de fabricação, dos quais se destaca o aumento do retorno elástico quando comparado aos aços convencionais. O retorno elástico é uma deformação geométrica da peça embutida e que, para processos realizados na temperatura ambiente, pode ser controlado por ajustes na geometria da ferramenta e pelo ajuste da tensão na chapa.

O controle da temperatura de

embutimento também é apontado como outra alternativa para controle do retorno elástico. Ele pode ser medido em peças obtidas de experimentos práticos de embutimento, e também pode ser previsto computacionalmente através da análise numérica pelo método de elementos finitos. A compreensão dos relacionamentos entre a temperatura de embutimento, as características dos materiais, os parâmetros práticos e os parâmetros computacionais, pode melhorar a previsão do retorno elástico para peças embutidas em aços de alta resistência. Por isto, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência de temperatura de embutimento no retorno elástico em aços de alta resistência. Para isto, foram realizados ensaios de tração para várias temperaturas para os aços HSLA350/440 e DP350/600. Também foram realizados experimentos práticos de embutimento com várias temperaturas, baseados no *benchmark problem*, proposto originalmente na conferência *Numisheet* (1993). Foi medido o retorno elástico nas peças embutidas, e foram realizados ensaios de metalografia e microdureza. Foram realizados experimentos computacionais com base no modelo de *Hensel-Spittel* que considera fatores mecânicos e metalúrgicos para previsão do comportamento dos materiais em função da temperatura. Como principal resultado, foi comprovado que o aumento da temperatura de embutimento resulta na redução do retorno elástico. Foi observado um comportamento peculiar nas peças embutidas na temperatura de 600°C, que sugere trabalhos futuros.

Palavras-chave: Aços de alta resistência. Embutimento. Retorno elástico. Temperatura. Simulação numérica.

ABSTRACT

The replacement of conventional steels with high strength steels is a commitment of the automotive industry to manufacture of deep drawing parts. As a result, the use of thinner sheets with maintenance of mechanical properties can be associated with reduced component weight and reduced costs. However, the use of high strength steels implies the aggravation of some manufacturing problems, especially the springback increase, when compared to conventional steels. Springback in deep drawing parts processed at room temperature is the geometric deviation that can be set by adjustments in tool geometry and by adjusting the tension in the sheet. The deep drawing temperature control is another alternative for springback control. Springback can be measured in deep drawing experiments parts and can be predicted computationally by numerical analysis using the finite element method. Understanding the relationships between the deep drawing temperature, material characteristics, practical parameters and computational parameters, can improve prediction of elastic return for deep drawing parts in high strength steels. The objective of this work was to study the influence of deep drawing temperature on the springback in high strength steels. It were performed tensile tests at various temperatures for the HSLA350/440 and DP350/600 steels. It were also performed practical deep drawing experiments with various temperatures, based on the benchmark problem originally proposed at the Numisheet (1993) conference. It was measured springback on the deep drawing parts, and it were performed metallography and micro hardness tests. Computational experiments based on the *Hensel-Spittel* model that considers mechanical and metallurgical factors to predict the behavior of materials as a function of temperature. As the main result, the increase in temperature results in the reduction of the springback in deep drawing parts. One special behavior in the deep drawing parts at the temperature of 600°C suggests future works.

Keywords: High Strength Steels. Deep drawing. Springback. Temperature. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COMPONENTES ESTRUTURAIS EM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA	19
FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	20
FIGURA 3 – COMPARATIVO ENTRE HSLA350/450 E DP350/600	22
FIGURA 4 – MICROGRAFIAS DO AÇO HSLA350/440 E DP350/600	23
FIGURA 5 – PERFIL CHAPÉU, EMBUTIDOS NOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600	24
FIGURA 6 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO DP350/600 E HSLA350/450	27
FIGURA 7 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO COM A TAXA DE DEFORMAÇÃO	28
FIGURA 8 – DIMENSÕES DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO	30
FIGURA 9 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA PARA EMBUTIMENTO	30
FIGURA 10 - DEFINIÇÃO DAS REGIÕES DE MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO	31
FIGURA 11 – RETORNO ELÁSTICO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO	33
FIGURA 12 – VARIANTES DA ESTAMPAGEM A QUENTE: A) DIRETA B) INDIRETA	36
FIGURA 13 – MÉTODOS DE AQUECIMENTO DAS CHAPAS PARA ESTAMPAGEM	37
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA COM AS ETAPAS DO TRABALHO	46
FIGURA 15 – EQUIPAMENTO SERVO-HIDRÁULICO PARA ENSAIOS MECÂNICOS.	48
FIGURA 16 - CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	48
FIGURA 17 - CURVAS DE AQUECIMENTO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	49
FIGURA 18 – PRENSA HIDRÁULICA PARA OS EXPERIMENTOS PRÁTICOS	50
FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO	51
FIGURA 20 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE EMBUTIMENTO	52
FIGURA 21 – RELÓGIO INDICADOR DA PRESSÃO DO PRENSA CHAPAS	52
FIGURA 22 – FORNO PARA AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS	53
FIGURA 23 – TERMOPAR E TERMÔMETRO DIGITAL	54
FIGURA 24 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	54
FIGURA 25 – VARIÁVEIS DE RESPOSTA DO RETORNO ELÁSTICO	57

FIGURA 26 – IMAGEM DIGITALIZADA DO CORPO DE PROVA	58
FIGURA 27 - MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO COMPUTADOR	58
FIGURA 28 – REGIÃO DO RAIO DE CURVAMENTO DE PAREDE	59
FIGURA 29 – MICRÔMETRO DE PONTA ABAULADA.....	59
FIGURA 30 – MICROSCÓPIO ÓTICO	60
FIGURA 31 – DURÔMETRO MICRO VICKERS.....	60
FIGURA 32– MODELO DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO COM $\frac{1}{4}$ DA CHAPA	61
FIGURA 33 – DIAGRAMA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO HSLA350/440 X DP350/600	68
FIGURA 34 – TENSÃO DEFORMAÇÃO VERDADEIRA HSLA350/440 X DP350/600	69
FIGURA 35 – DEFORMAÇÃO ELÁSTICA HSLA350/440 X DP350/600.....	70
FIGURA 36 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO HSLA350/440 X DP350/600.....	72
FIGURA 37 – CURVAS DE ESCOAMENTO HSLA350/440 X DP350/600	74
FIGURA 38 – SENSIBILIDADE À TAXA DE DEFORMAÇÃO HSLA350/440 X DP350/600...	76
FIGURA 39 – TENSÃO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO ...	77
FIGURA 40 – MODELO DE HENSEL-SPITTEL AJUSTADO PARA TEMPERATURA	78
FIGURA 41 – MODELO DE HENSEL-SPITTEL AJUSTADO PARA TAXA DE DEFORMAÇÃO.....	79
FIGURA 42 – CORPOS DE PROVA RESULTANTES DA OPERAÇÃO DE EMBUTIMENTO	81
FIGURA 43 – CORPOS DE PROVA E SUAS CONDIÇÕES DE EMBUTIMENTO	82
FIGURA 44 – RETORNO ELÁSTICO RESULTANTE DOS EXPERIMENTOS PRÁTICOS...	87
FIGURA 45 – ESPESSURA DA PEÇA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	88
FIGURA 46 – MATERIAIS CONFORME RECEBIDOS DO FABRICANTE	89
FIGURA 47 – MICROGRAFIAS - AQUECIDOS A 800°C E RESFRIADOS EM ÁGUA.....	90
FIGURA 48 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS A 800°C.....	90
FIGURA 49 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS EM HSLA350/440.....	92
FIGURA 50 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS EM DP350/600	93
FIGURA 51 – DUREZA DAS PEÇAS EMBUTIDAS COM V=2,5MM/S	94

FIGURA 52 – DUREZA DAS PEÇAS EMBUTIDAS COM V=15MM/S	95
FIGURA 53 – FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO NO AMBIENTE COMPUTACIONAL.....	96
FIGURA 54 – RETORNO ELÁSTICO SIMULAÇÃO HSLA350/440 (A) $\Theta 1$, (B) $\Theta 2$ E (C) P ...	97
FIGURA 55 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO NO HSLA350/440.....	98
FIGURA 56 – RETORNO ELÁSTICO SIMULAÇÃO DP350/600 (A) $\Theta 1$, (B) $\Theta 2$ E (C) P	99
FIGURA 57 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO NO DP350/600	100
FIGURA 58 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS HSLA350/440	101
FIGURA 59 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS DP350/600.....	102
FIGURA 60 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS T=800°C	104
FIGURA 61 – COMPARATIVO DO RETORNO ELÁSTICO NO AÇO HSLA350/440.....	107
FIGURA 62 – COMPARATIVO DO RETORNO ELÁSTICO NO AÇO DP350/600	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS UTILIZADOS NO ULSAB-AVC.....	22
TABELA 2 – FATORES DOS EXPERIMENTOS DE EMBUTIMENTO E NÍVEIS DE CONTROLE.....	56
TABELA 3 – RODADAS EXPERIMENTAIS COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	56
TABELA 4 – VARIÁVEIS RESPOSTA DO RETORNO ELÁSTICO.....	57
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS HSLA350/440 E DP350/600	62
TABELA 6 – COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	62
TABELA 7 – COEFICIENTES DE ANISOTROPIA PLÁSTICA DOS MATERIAIS	64
TABELA 8 – FATORES DE CONTROLE NOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	64
TABELA 9 – RODADAS EXPERIMENTAIS PARA AJUSTE DO MODELO COMPUTACIONAL	65
TABELA 10 – MÓDULO APARENTE DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DE T (°C)	71
TABELA 11 – COEFICIENTES DO MODELO DE HENSEL-SPITTEL.....	80
TABELA 12 – RETORNO ELÁSTICO PARA PEÇAS EMBUTIDAS EM HSLA350/440	83
TABELA 13 – RETORNO ELÁSTICO PARA PEÇAS EMBUTIDAS EM DP350/600.....	84
TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO RETORNO ELÁSTICO NAS PEÇAS HSLA350/440	85
TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO RETORNO ELÁSTICO NAS PEÇAS DP350/600	86
TABELA 16 – DUREZA DOS MATERIAIS EM ENSAIOS PRELIMINARES	94
TABELA 17 – RETORNO ELÁSTICO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS - HSLA350/440	102
TABELA 18 – RETORNO ELÁSTICO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS - DP350/600	103
TABELA 19 – RETORNO ELÁSTICO PARA OS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EM T = 800°C.....	105
TABELA 20 – COMPARATIVO PRÁTICO X COMPUTACIONAL - HSLA350/440.....	106
TABELA 21 – COMPARATIVO PRÁTICO X COMPUTACIONAL - DP350/600	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Termo em português	Termo em inglês
E	módulo de elasticidade (módulo de Young)	<i>Young's modulus</i>
E_a	módulo aparente de elasticidade	<i>apparent modulus</i>
L	comprimento	<i>length</i>
m	sensibilidade à taxa de deformação	<i>strain rate sensitivity</i>
n	coeficiente de encruamento	<i>strain hardening exponent</i>
R	parâmetros anisotrópicos de Hill'48	<i>anisotropy parameters</i>
r	coeficiente de anisotropia normal	<i>normal anisotropy</i>
t	espessura do material, tempo	<i>material thickness, time</i>
v	velocidade de punção	<i>punch speed</i>
W	largura	<i>width</i>
θ	ângulo de dobramento (flange e parede)	<i>angle of bending</i>
μ	coeficiente de atrito	<i>coefficient of friction</i>
ν	coeficiente de Poisson	<i>Poisson's ratio</i>
ρ	raio de curvatura (curvamento de parede)	<i>radius of curvature</i>
ε	deformação verdadeira	<i>true strain</i>
$\dot{\varepsilon}$	taxa de deformação	<i>strain rate</i>
σ	tensão equivalente	<i>true equivalent stress</i>
σ	tensão verdadeira	<i>true stress</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
1.4 HIPÓTESE.....	17
1.5 OBJETIVO.....	17
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.7 ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA	20
2.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	25
2.2.1 Ensaios de tração.....	25
2.2.2 Avaliação do retorno elástico.....	30
2.2.3 Ensaios de metalografia e microdureza.....	32
2.3 RETORNO ELÁSTICO APÓS OPERAÇÕES DE EMBUTIMENTO	33
2.3.1 Retorno elástico nos aços de alta resistência.....	34
2.4 A TEMPERATURA NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM	36
2.4.1 Métodos de aquecimento das chapas para estampagem.....	37
2.4.2 Estudos de operações de estampagem com controle de temperatura	38
2.5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS NOS PROCESSOS DE ESTAMPAGEM.....	40
2.5.1 Função de escoamento e modelo de encruamento.....	41
2.5.2 Experimentos computacionais e o retorno elástico.....	42
2.5.3 Simulação de estampagem a quente	43
2.6 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO RETORNO ELÁSTICO	45
3 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.1 EXPERIMENTOS PRÁTICOS	47
3.1.1 Ensaios de tração com controle de temperatura	47
3.1.2 Experimentos práticos de embutimento.....	50
3.1.3 Parâmetros dos ensaios experimentais de embutimento	56
3.1.4 Medição do retorno elástico nos corpos de prova.....	57
3.1.5 Análise metalográfica, microdureza e espessura.....	59

3.2	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	61
3.2.1	Construção de um modelo computacional	61
3.2.2	Realização dos experimentos computacionais	64
3.2.3	Obtenção do retorno elástico previsto computacionalmente.....	66
3.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO COM CONTROLE DE TEMPERATURA	68
4.2	EXPERIMENTOS PRÁTICOS DE EMBUTIMENTO.....	81
4.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA E MICRODUREZA.....	89
4.4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS DE EMBUTIMENTO	96
4.5	COMPARATIVO DOS RESULTADOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS	106
5	CONCLUSÃO.....	110
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

O embutimento é um processo de transformação mecânica que consiste na conformação de uma chapa à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de uma ferramenta. Nesta operação ocorre a deformação (alongamento e a contração) das dimensões dos elementos de volume, em três dimensões. A chapa, originalmente plana, adquire uma nova forma geométrica.

Na indústria automobilística, a conformação de peças a partir de chapas metálicas é aplicada na construção de elementos estruturais dos chassis e elementos da carroceria dos veículos, buscando conciliar o aumento da segurança e redução do impacto ambiental através redução do peso de componentes e a redução de custos de produção. Esta demanda complexa é conseguida, em parte, com a aplicação de materiais mais resistentes e o uso de chapas mais finas na produção de automóveis. Por outro lado, a utilização destes materiais com maior resistência mecânica exige ferramental e processos de conformação específicos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Vários estudos apontam que é necessária a redução na emissão de poluentes, redução no uso de matérias-primas e aumento das condições de segurança para utilização de automóveis. Os fabricantes de veículos buscam o atendimento destas demandas com o desenvolvimento de materiais e processos de fabricação mais específicos. (Lee *et al.*, 2009; Karbasian e Tekkaya, 2010)

Dentre as soluções, pode-se destacar a utilização dos aços de alta resistência, tradução do termo HSS – *High Strength Steel*, e dos aços avançados de alta resistência, tradução do termo AHSS – *Advanced High Strength Steel*, que oferecem uma boa relação de resistência mecânica em função do peso. (World Auto Steel, 2014)

No contexto do presente trabalho, foram estudados dois aços específicos, a saber: o aço HSLA350/440 (*High Strength Low Alloy*) e o aço DP350/600 (*Dual Phase*). Para simplificação do texto, os dois materiais são tratados de uma forma genérica pelo termo “aços de alta resistência”.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O aumento na utilização dos aços de alta resistência na conformação de componentes automotivos é progressivo e irreversível. Ainda não foram alcançados os limites de conformação, sobretudo no que diz respeito ao controle dos parâmetros de processo, de ferramenta e às variações de temperatura de estampagem. (Wagoner *et al.*, 2013)

O principal problema identificado na estampagem de componentes automotivos fabricados em aços de alta resistência é o retorno elástico. O retorno elástico é uma variação da geometria final do componente após as operações de conformação. (World Auto Steel, 2014)

Sua ocorrência é resultante da ação das tensões residuais nos componentes estampados oriundas do material estampado e das condições de processo. Trata-se de um fenômeno intrínseco da própria conformação mecânica. (Lajarin, 2012)

A dificuldade na previsão e no controle do retorno elástico pode implicar na necessidade de ajustes de projeto na geometria da ferramenta, ajuste dos parâmetros de processo e no controle de temperatura de conformação durante a produção. O retorno elástico nas peças embutidas pode gerar dificuldades de montagem na linha de produção, ou redução da qualidade do produto final. (Makinouch, 1993; Gan e Wagoner, 2004; Burchitz *et al.*, 2006; Keeler, 2008; Crina, 2009)

Neste contexto, a estampagem com aumento da temperatura exerce grande importância nos processos de produção pois, enquanto teoria reduz o retorno elástico e, enquanto prática anula os efeitos do retorno elástico. Enquanto a estampagem a frio resulta em grandes magnitudes do retorno elástico e exige altos esforços para conformação, por sua vez, as altas temperaturas da conformação a quente exigem além de equipamentos mais complexos, maior quantidade de energia para aquecimento, que também podem resultar em maiores custos de produção. (Gorni, 2010; Liu *et al.*, 2010; Souza, 2013)

Para a previsão e controle do retorno elástico geralmente é feita a análise experimental que pode contribuir na geração de princípios de projeto para melhoria. Entretanto, apesar de o conhecimento experimental gerar uma série de recomendações práticas, os modelos matemáticos para equacionamento do problema ainda necessitam de complemento pela análise fenomenológica. (Chung *et al.*, 2005a; Nikhare *et al.*, 2008; Lajarin, 2012)

Ou seja, ainda não existe um modelo matemático e fenomenológico que descreva perfeitamente os efeitos do retorno elástico nas operações de estampagem a quente, efetuadas com o aumento da temperatura da matéria prima, considerando componentes fabricados a partir dos aços de alta resistência. (Lee *et al.*, 2009; Karbasian e Tekkaya, 2010; Wagoner *et al.*, 2013; Kusumi, 2013)

1.3 JUSTIFICATIVA

Uma alternativa para entendimento do retorno elástico é a avaliação das características dos materiais e do seu comportamento sob determinadas condições de processo. Neste contexto, os próprios fabricantes de matéria prima oferecem uma série de informações sobre a resistência dos materiais com o intuito de facilitar o projeto de componentes embutidos. Entretanto, estas informações sobre propriedades dos materiais geralmente consideram o processamento apenas em temperatura ambiente, sendo escasso este tipo de informação para diferentes temperaturas.

Além disso, as informações dos fabricantes são genéricas e não cobrem todas as necessidades de compreensão do comportamento dos materiais em condições específicas de processo. Isto ocorre porque, de acordo com a revisão de literatura, além das características dos materiais, também os parâmetros de processo e a forma geométrica da ferramenta são muito influentes no retorno elástico final de componentes embutidos.

Sob o ponto de vista prático, na estampagem a frio dos aços de alta resistência, não há como eliminar o efeito das tensões residuais, sendo necessária a otimização experimental dos parâmetros de processo durante a conformação com o objetivo de controlar o retorno elástico. O ajuste dos parâmetros geométricos das ferramentas e parâmetros de processo influencia na magnitude do retorno elástico, e o conhecimento desta influência, que é essencialmente empírico, possibilita melhores projetos de ferramentas. O retorno elástico nas operações de embutimento a frio é controlado principalmente pela regulação da força de prensa chapas.

Ainda na abordagem prática e experimental, uma alternativa para reduzir o retorno elástico é o ajuste da temperatura. A execução de operações de estampagem

a quente é apontada na literatura como principal alternativa de processo para a redução do retorno elástico na fabricação de componentes de geometrias complexas em materiais de alta resistência mecânica.

O problema destas abordagens práticas e experimentais é a necessidade de equipamentos para ensaios experimentais e a grande quantidade de testes e ajustes nas ferramentas e processos. Ou seja, o controle do retorno elástico é fundamentado principalmente na aplicação de tabelas práticas, nos ajustes de processo e no conhecimento empírico dos projetistas. Como o desenvolvimento dos aços de alta resistência é relativamente recente, ainda não há dados empíricos suficientes.

Em uma outra abordagem mais teórica, a análise dos processos de conformação pode ser realizada pela simulação numérica com métodos de elementos finitos. Neste caso, é necessário o desenvolvimento de modelos computacionais e a criação de bancos de dados experimentais que permitam a alimentação destes modelos, de forma a prever o comportamento dos materiais e componentes estampados ainda na etapa de projeto. O problema é que o uso destes programas de simulação exige conhecimento prático do projetista e os modelos matemáticos atuais ainda não descrevem de maneira consensual os efeitos não lineares da temperatura na previsão do retorno elástico para os aços de alta resistência.

Com a realização do presente trabalho é esperada uma contribuição na compreensão dos relacionamentos entre as características dos materiais com os parâmetros práticos e parâmetros computacionais que permitam a previsão, redução e o controle do retorno elástico em peças embutidas em aços de alta resistência conformados em diferentes temperaturas.

Neste contexto, o estudo da influência da temperatura de embutimento no retorno elástico contribui na consolidação de informações sobre as propriedades dos aços de alta resistência sob diferentes condições de temperatura, na experimentação de parâmetros práticos indicados na literatura e também na validação e no refinamento dos modelos matemáticos utilizados atualmente nas simulações numéricas de operações de conformação.

Esta compreensão melhorada poderá contribuir, em última instância, com o aumento da aplicação dos aços de alta resistência na fabricação de automóveis resultando na redução de peso dos veículos, aumento da resistência mecânica, melhoria da segurança, redução do uso de matérias primas e reduções na emissão de poluentes e danos ambientais.

1.4 HIPÓTESE

A principal hipótese considerada com base na revisão de literatura, é que o retorno elástico de peças embutidas em aços de alta resistência pode ser reduzido com o aumento da temperatura no processo de embutimento.

Deseja-se comprovar através de experimentos práticos que o aquecimento pode resultar na modificação das propriedades dos materiais e que o controle da temperatura pode influenciar diretamente no retorno elástico e consequentemente na forma geométrica final dos componentes estampados.

Com base nos resultados de experimentos práticos, deseja-se alimentar um modelo numérico que permita reproduzir a operação de embutimento em ensaios de simulação numérica no ambiente computacional. O conhecimento da influência dos parâmetros práticos e computacionais deve permitir a previsão, redução e controle do retorno elástico após a conformação de aços de alta resistência.

1.5 OBJETIVO

O objetivo é explicar como e porque o aquecimento vai reduzir o retorno elástico de peças embutidas em aços de alta resistência.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer testes preliminares para confirmar a variação do retorno elástico com o aumento da temperatura do processo
- Determinar as propriedades dos aços HSLA350/440 e DP350/600 em diferentes temperaturas de processo
- Construir uma ferramenta que permita executar experimentos práticos de embutimento com corpos de prova em diferentes temperaturas.

- Realizar experimentos práticos de embutimento com diferentes temperaturas em chapas de aços HSLA350/440 e DP350/600.
- Medir o retorno elástico resultante dos experimentos práticos.
- Investigar os modelos teóricos de previsão sobre o retorno elástico.
- Realizar experimentos computacionais de retorno elástico nas mesmas condições dos experimentos realizados na prática.
- Comparar os resultados dos experimentos práticos com os resultados dos experimentos computacionais.
- Estabelecer relações entre o aumento da temperatura e a redução do retorno elástico para os aços de alta resistência.

1.7 ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho contém o estudo da influência da temperatura no retorno elástico de peças embutidas em aços de alta resistência.

O capítulo 1 contém uma introdução ao tema. No capítulo 2 é apresentada e revisão bibliográfica que fundamenta o trabalho. São descritos de maneira sucinta as principais pesquisas realizadas na área nos últimos anos. No capítulo 3 é apresentada a metodologia de trabalho e o planejamento experimental adotado. No capítulo 4 são reportados os resultados dos experimentos práticos e computacionais. Os resultados são sumarizados no capítulo 5, seguidos da conclusão do trabalho. As referências bibliográficas são indicadas no capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A demanda por veículos mais seguros e a necessidade de redução do impacto ambiental acentuou o desenvolvimento de materiais de alta tecnologia para uso na indústria automobilística. (Akerstrom, 2006)

A segurança dos automóveis pode ser associada à resistência mecânica de componentes que devem reagir em caso de colisões e a redução do impacto ambiental pode ser obtida pela redução de peso. Automóveis mais leves necessitam de menos matéria prima em sua fabricação e também consomem menos combustível. Por estas razões os aços convencionais estão sendo progressivamente substituídos por outros materiais mais avançados que resultam em alta resistência e redução do peso.

A Figura 1 ilustra um típico automóvel de passeio e alguns de seus componentes estruturais fabricados a partir dos aços de alta resistência. Neste contexto o estudo destes materiais é justificado pela extensa aplicação industrial. Não há como retroceder na utilização destes materiais. (Arcelor Mittal, 2014)

FIGURA 1 – COMPONENTES ESTRUTURAIS EM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA



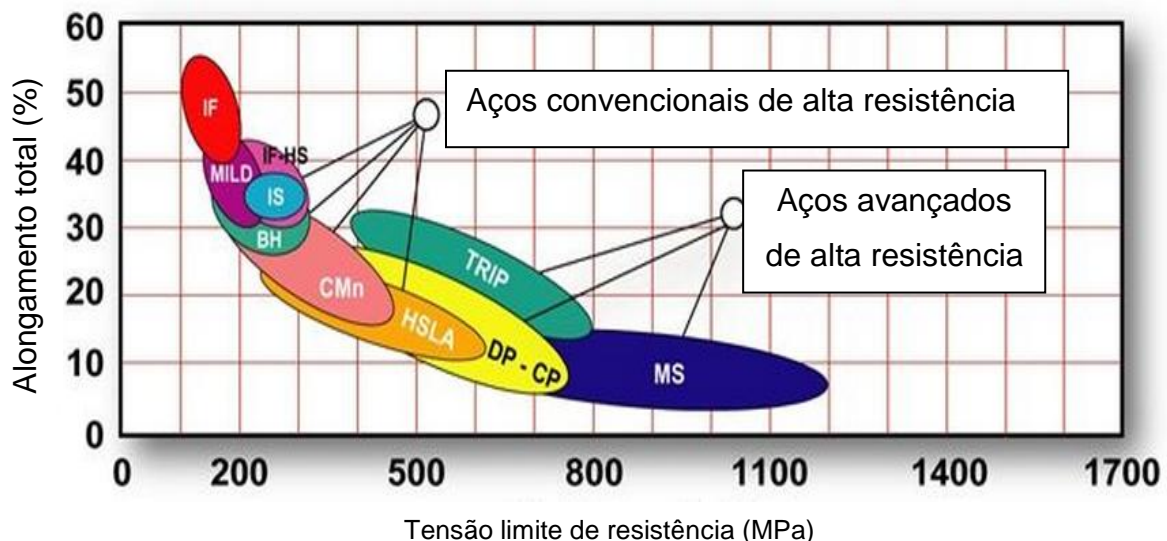
Fonte: Arcelor Mittal (2014)

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA

A utilização de aços convencionais de alta resistência (HSS – *High Strength Steel*) e de aços avançados de alta resistência (AHSS – *Advanced High Strength Steel*) permite a fabricação de componentes estruturais com resistência da ordem de 400MPa até 1200MPa quando processados a frio e pode resultar na redução de até 30% do peso com uso de chapas de menor espessura. Atualmente o uso de componentes estampados em AHSS pode representar até 22% do peso do chassi e até 20% do peso da carroceria de um automóvel de passeio. (Arcelor Mittal, 2014)

A Figura 2 ilustra a classificação dos aços utilizados na indústria automotiva.

FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA



Fonte: Adaptado de World Auto Steel (2014)

Entre os aços utilizados na fabricação de automóveis, cabe destacar os aços HSLA (*High Strength Low Alloy*) que são materiais que têm sua resistência aumentada pelos elementos constituintes de sua micro-liga, pelos mecanismos de fortalecimento intersticial e substitucional, além do refino no tamanho de grão. São aplicados na construção de várias partes da carroceria dos automóveis onde é necessário o reforço para cargas de serviço. Também cabe destacar os aços DP (*Dual Phase*) que são materiais com elevada resistência mecânica a frio, superiores a 400MPa e com estrutura basicamente ferrítica com ilhas de martensita. O aumento da fração volumétrica das ilhas de martensita geralmente aumenta a resistências destes aços. (WorldAutosteel, 2014)

Os aços HSLA são classificados como aços convencionais de alta resistência enquanto que os aços DP são classificados como aços avançados de alta resistência. Este sistema de classificação foi utilizado no programa ULSAB-AVC (*UltraLight Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concept*). (WorldAutosteel, 2014)

Os aços HSLA são produzidos com tensão de escoamento na faixa de 290MPa a 550MPa e tensão limite de resistência na faixa de 415MPa a 700MPa. Devido ao seu baixo teor de carbono apresentam excelente soldabilidade e o seu desenvolvimento foi inicialmente impulsionado pela demanda por aços resistentes, tenazes e soldáveis para a indústria petrolífera. De acordo com Arcelor Mittal (2014) os aços HSLA são endurecidos através da precipitação e pelo refinamento do tamanho de grão, resultando em alta resistência com baixa liga.

Os aços DP apresentam tensão de escoamento na faixa de 350Mpa a 650Mpa e tensão limite de resistência na faixa de 450Mpa a 1200MPa. Apresentam estrutura de dupla fase, com uma fase em maior percentual de ferrita, geralmente contínua, conferindo ao material excelente ductilidade, cercado ilhas de martensita ou bainita e que resultam também excelentes taxas de encruamento. (Arcelor Mittal, 2014)

A taxa de encruamento associada ao excelente alongamento dos aços de alta resistência resulta em materiais com tensão limite de resistência muito maiores do que os aços convencionais de tensão de escoamento similar. Isto significa que os aços de alta resistência permitem a fabricação de peças com chapas mais finas e com a mesma resistência mecânica quando comparada com as peças fabricadas a partir dos aços convencionais. Por outro lado, a utilização de chapas mais finas e materiais mais resistentes acentua os efeitos do retorno elástico.

No contexto do presente trabalho, foram estudados o aço de alta resistência HSLA350/440 (*High Strength Low Alloy*) e o aço avançado de alta resistência DP350/600 (*Dual Phase*). Estes dois materiais foram escolhidos por serem bastante utilizados na fabricação de carrocerias de automóveis e por estarem disponíveis no laboratório de conformação da UFPR. Nos resultados são apresentadas as características destes materiais e são comparadas as medidas do retorno elástico em peças embutidas obtidas a partir de experimentos práticos e experimentos computacionais. Para simplificação do texto, os dois materiais foram tratados de uma forma genérica pelo termo “aços de alta resistência”.

A Tabela 1 contém algumas das principais características do aço HSLA350/440 e do aço DP350/600, informadas pelo fabricante. Este tipo de informação é disponibilizado aos projetistas e engenheiros para desenvolvimento de produtos fabricados com estes materiais.

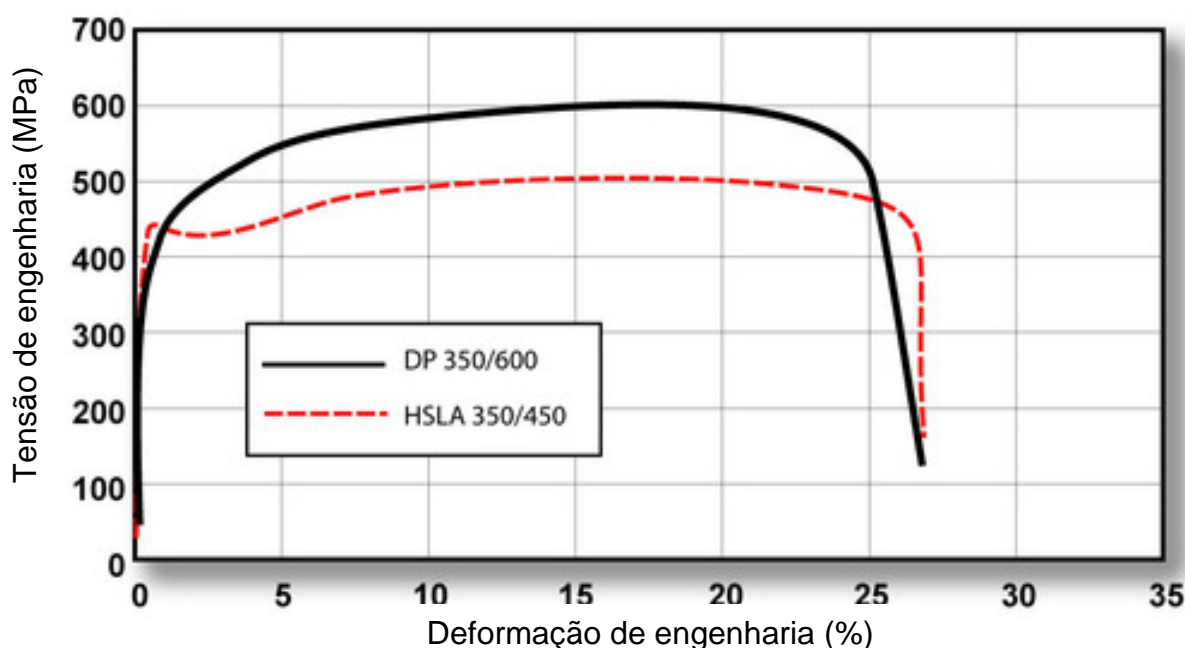
TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS UTILIZADOS NO ULSAB-AVC.

Especificação do aço	Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite de resistência (MPa)	Alongamento total (%)
HSLA350/440	350	450	23 – 27
DP350/600	350	600	24 – 30

Fonte: ArcelorMittal (2014)

A Figura 3 contém um gráfico com as curvas de tensão versus deformação de engenharia que permitem fazer um comparativo entre os aços HSLA350/450 e DP350/600. Pode-se observar que o aço DP350/600 exibe maior tensão limite de resistência do que o HSLA350/450.

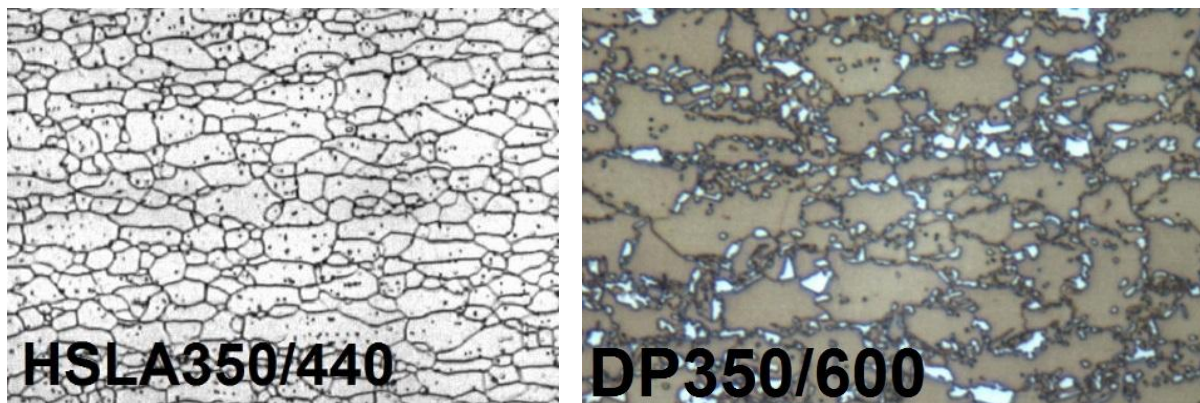
FIGURA 3 – COMPARATIVO ENTRE HSLA350/450 E DP350/600



Fonte: World Auto Steel (2014)

Na Figura 4 é possível observar as micrografias do aço HSLA350/440 e do aço DP350/600. O aço HSLA350/440 é composto por uma matriz ferrítica e contorno dos grãos por elementos ligados em forma de carbonetos. O aço DP350/600 é formado por ilhas de martensita rodeadas por uma matriz ferrítica.

FIGURA 4 – MICROGRAFIAS DO AÇO HSLA350/440 E DP350/600



Fonte: Arcelor Mittal (2014)

Atualmente, os aços HSLA350/440 tem aplicação na indústria automobilística, na fabricação de várias peças de automóveis. Vários autores caracterizaram este tipo de material, relatando a aplicação justificada pela necessidade de aumentar a resistência mecânica comparada aos aços convencionais e melhorar resistência à corrosão atmosférica, podendo citar: Cohen e Hansen (1985), ASM International (2001), Arcelor Mittal (2014).

Os aços DP350/600 tem aplicação na indústria automobilística principalmente nos componentes de reforço da carroceria de automóveis. Vários autores caracterizaram os aços DP, por exemplo, Chemin Filho (2011) realizou ensaios com o aço DP350/600, fazendo o levantamento da curva limite de conformação (CLC). Tigrinho (2011) estudou a influência dos estados de tensão aplicados nas operações de conformação. Lajarin (2012) estudou o retorno elástico nos aços de alta resistência. Santos (2013) estudou a influência da força de pós dobra no retorno elástico dos aços de alta resistência. Todos estes autores realizaram ensaios com o aço DP350/600 e o conjunto de suas obras apresenta uma descrição bastante detalhada das características mecânicas deste material para temperatura ambiente.

Na Figura 5 pode ser observado um exemplo de duas peças conhecidas como perfil chapéu (*channel bending*), com canais embutidos com a mesma ferramenta, porém, com divergência de forma provocada pelas características do material.

FIGURA 5 – PERFIL CHAPÉU, EMBUTIDOS NOS AÇOS HSLA350/450 E DP350/600



HSLA350/450

DP350/600

Fonte: Adaptado de WorldAutoSteel (2014)

A peça ilustrada no lado esquerdo da Figura 5 foi embutida em aço HSLA350/450, enquanto a peça ilustrada no lado direito foi embutida em aço DP350/600, aplicando a mesma ferramenta em um processo efetuado na temperatura ambiente. Apesar de ambos os materiais apresentarem a mesma tensão de escoamento, pode-se observar que as peças resultaram em geometrias diferentes, e esta diferença pode ser associada à ocorrência de diferentes retornos elásticos. Este tipo de perfil é muito comum nos componentes estruturais automotivos, como pode ser observado também na Figura 1 (vide pg.19), que ilustra a carroceria de um automóvel de passeio.

Em termos dos processos de fabricação, a utilização dos aços de alta resistência implica no aumento significativo dos esforços necessários para embutimento, e em tensões que podem resultar no aumento do retorno elástico representado pela variação geométrica da forma e variações dimensionais dos componentes embutidos.

De uma forma geral, a utilização de materiais de fabricação mais resistentes também implica na necessidade de máquinas e ferramentas mais robustas, e exigem o controle mais refinado dos parâmetros de processo. Ou seja, o projeto de matrizes de conformação tem de levar em conta o tipo de material, suas características específicas e as variações resultantes dos processos de fabricação para atender à demanda por componentes conformados a partir das chapas de aço de alta resistência.

2.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Os fabricantes de materiais geralmente fornecem características tais como composição química e metalúrgica, bem como as relações entre tensão e deformação para os processos de fabricação na temperatura ambiente. Isto facilita muito o trabalho de engenharia na escolha do material e no projeto dos componentes estampados.

Entretanto, para o estudo da influência da temperatura no retorno elástico de peças embutidas, é necessário fazer ensaios experimentais para levantamento de algumas características específicas dos materiais conforme recebidos de fábrica e submetidos a diferentes temperaturas. Isto pode oferecer indícios do comportamento dos corpos de prova nas operações de embutimento, e também devem permitir a repetibilidade do estudo.

Para avaliar as características específicas dos aços de alta resistência para estudo do retorno elástico é necessário fazer uma série de ensaios experimentais, que estão descritos a seguir.

2.2.1 Ensaios de tração

Para investigação do retorno elástico é importante avaliar a propriedade de encruamento do material que pode ser definida pelo aumento na dureza ou da resistência mecânica, devido à deformação plástica realizada abaixo da temperatura de recristalização. Quando o material metálico é deformado plasticamente ocorre o empilhamento das discordâncias aumentando a resistência do material. Esse fenômeno é conhecido como encruamento. (Lajarin, 2012)

Neste contexto, o material pode ser classificado de acordo com o seu o coeficiente de encruamento, representado pela letra n , que permite a quantificação do aumento da resistência ao escoamento devido ao encruamento do material da peça submetida a um gradiente de tensão.

Quanto maior for o coeficiente de encruamento tanto maior será a capacidade do material se deformar, em tração, sem que ocorra a estricção. A capacidade de estiramento da chapa metálica é fortemente influenciada pelo coeficiente de

encruamento. O valor de n é um parâmetro chave para determinar o limite de estiramento máximo nas operações de embutimento. (Lajarin, 2012)

O coeficiente de encruamento (Equação 2) pode ser definido como o gradiente da curva de escoamento, representada pela equação de *Hollomon* (Equação 1), no ponto de carga máxima do ensaio de tração.

$$\varepsilon_v = \ln (1 + \varepsilon_e) \quad (1)$$

$$n = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon_v} \right)_{F_{max}} \quad (2)$$

Onde,

ε_v = deformação verdadeira

ε_e = deformação de engenharia

σ = tensão verdadeira

n = coeficiente de encruamento

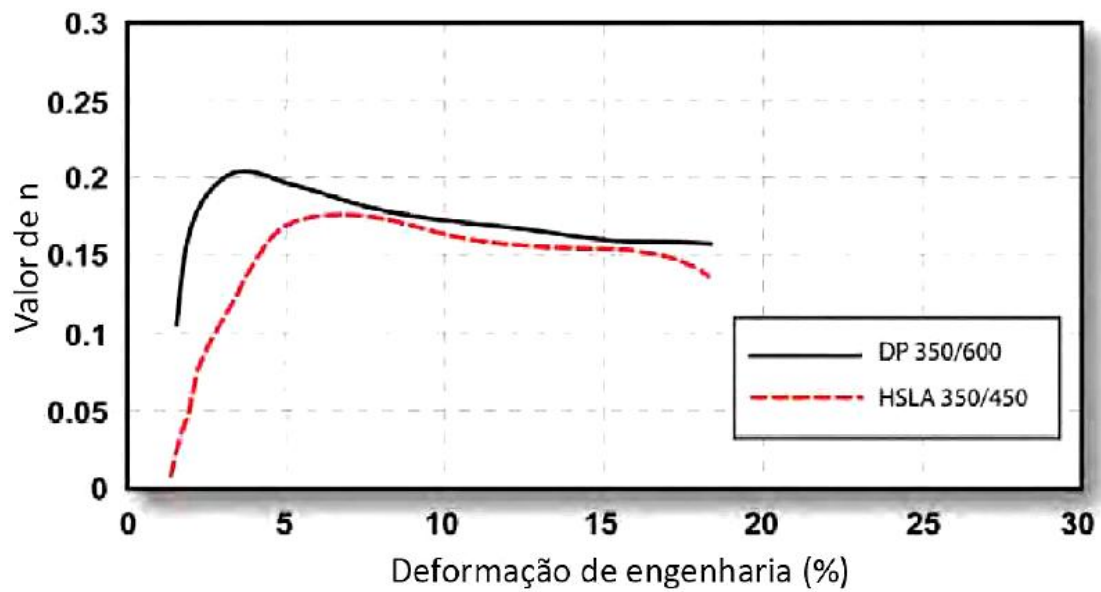
F_{max} = força máxima suportada no ensaio de tração

No ponto de força máxima, a derivada da força é nula. Então, aplicando-se os conceitos de incremento de deformação e fazendo o desenvolvimento matemático, pode-se chegar à conclusão que o coeficiente de encruamento é igual à deformação verdadeira verificada para o ponto de carga máxima. Quando $\varepsilon = 1$, a tensão de escoamento iguala-se ao valor de K (coeficiente de resistência).

A determinação do coeficiente de encruamento é simples, deve-se linearizar a equação de *Hollomon*, através da aplicação de logaritmos e uma regressão linear de $\log \sigma$ versus $\log \varepsilon$, a partir dos dados obtidos em ensaio de tração uniaxial. Chega-se assim ao coeficiente angular da reta representativa da equação linearizada.

Konieczny (2003) observou que tanto o HSLA350/450 quanto o DP350/600 apresentaram em média valores de $n = 0,14$, ambos obtidos por meio de um ensaio de tração convencional. Em seu trabalho, Konieczny (2003) também observou que, durante o ensaio de tração o coeficiente de encruamento sofre variação, e determinou os seus valores instantâneos conforme pode ser observado na Figura 6.

FIGURA 6 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO DP350/600 E HSLA350/450



Fonte: Konieczny (2003)

A taxa de deformação é definida pela razão entre a deformação e o tempo necessário para a deformação. Matematicamente representada pela Equação 3.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

Onde,

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação
 ε = deformação verdadeira
 t = tempo

Em termos práticos, a taxa de deformação pode ser calculada a partir dos resultados de um ensaio de tração, conforme descreve a Equação 4.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)}{h_0 - h_f} v \quad (4)$$

Onde,

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação
 h_0 = comprimento inicial do corpo de prova
 h_f = comprimento final do corpo de prova
 v = velocidade do ensaio

Para se estabelecer uma relação quantitativa entre taxa de deformação e a tensão de escoamento pode-se utilizar o modelo de *Ludwik*, descrito pela Equação 5.

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_0 \dot{\varepsilon}^N \quad (5)$$

Onde,

σ_{ε} = tensão de escoamento

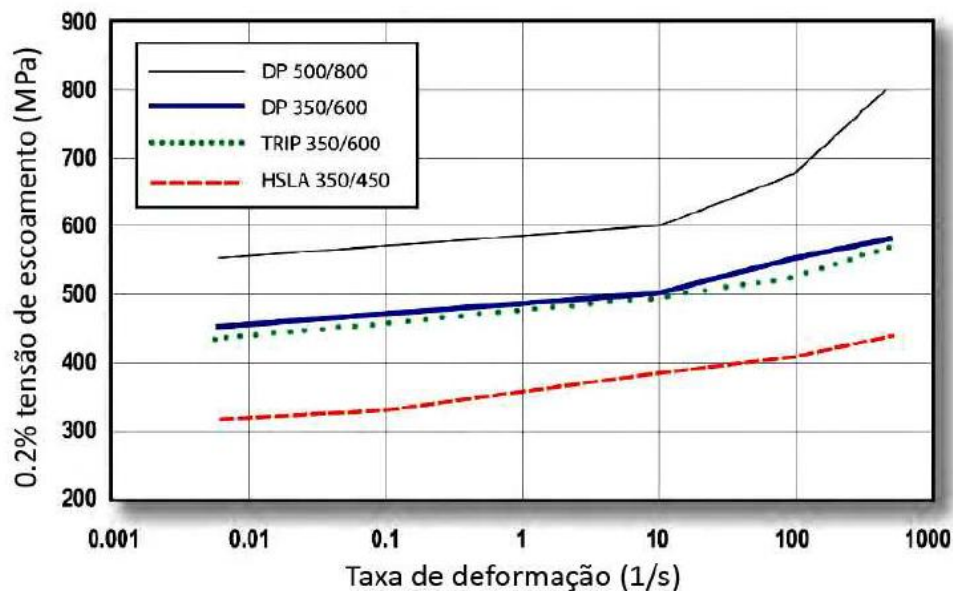
σ_0 = constante do material

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação

N = constante do material

Yan (2003) realizou ensaios de tração com diversas taxas de deformação, com os valores variando desde 10^{-3} s^{-1} (comumente encontradas em ensaios de tração) até 10^3 s^{-1} . O autor verificou que a tensão de escoamento aumenta diretamente com o aumento da taxa de deformação, conforme pode ser observado na Figura 7.

FIGURA 7 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO COM A TAXA DE DEFORMAÇÃO



Fonte: Yan (2003)

No trabalho a frio, a tensão de escoamento é elevada em cada nível de deformação, principalmente em função do fenômeno de encruamento. No trabalho a quente a tensão de escoamento é reduzida com o aumento da temperatura e também sofre a influência da velocidade de deformação. (Turreta, 2008)

Turreta (2008) e Batalha (2015) também descrevem uma função de escoamento plástico que também leva em conta o coeficiente de encruamento e a taxa de deformação com base na equação de *Hollomon* modificada, que pode ser observada na Equação 6.

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (6)$$

Onde,

σ = tensão verdadeira

K = coeficiente de resistência

ε = deformação verdadeira

n = coeficiente de encruamento

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação

m = coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação

É necessário considerar que nos ensaios de tração a quente, os materiais são mantidos em temperatura constante durante a aplicação dos esforços. Esta situação é diferente das condições de operação geralmente executadas em chão de fábrica, em relação à temperatura de conformação. (Bresciani Filho *et. al*, 2011)

Com relação aos modelos que levam em conta a temperatura de processo, o modelo de *Hensel-Spittel*, (Equação 7), também citado e utilizado por Turreta (2008) e Batalha (2015), considera três fatores como sendo os mais importantes para representação da deformação plástica de ligas metálicas nos trabalhos a quente: a temperatura, a deformação e a taxa de deformação. (Hensel and Spittel, 1978)

$$\sigma = A e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_8 T} T^{m_9} \quad (7)$$

Onde,

σ = tensão verdadeira

A = constante do material

e = 2,71828183

ε = deformação verdadeira

$\dot{\varepsilon}$ = taxa de deformação

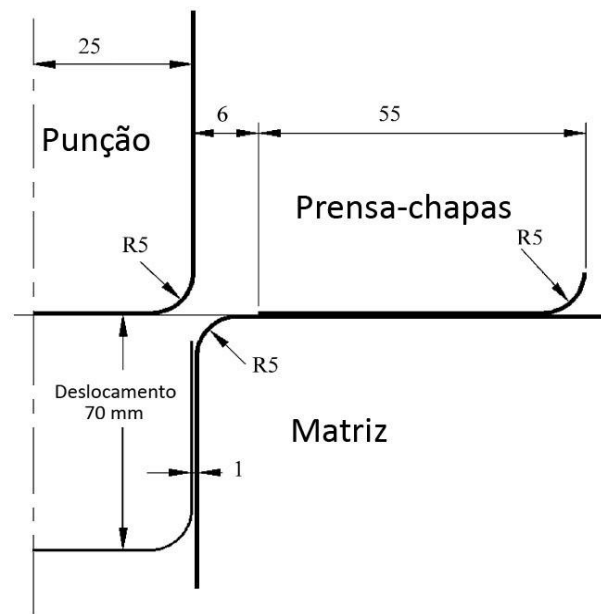
$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ = coeficientes de deformação

A obtenção dos coeficientes de deformação e demais parâmetros pode ser feita através de regressão não linear com base nos resultados dos ensaios de tração.

2.2.2 Avaliação do retorno elástico

Neste trabalho, a avaliação experimental do retorno elástico foi realizada com o uso de uma ferramenta de perfil-chapéu por ser um perfil comum em componentes estruturais automotivos e devido a ele ser amplamente adotado na literatura. As dimensões e as características da ferramenta seguem modelo proposto como “*benchmark problem*” na conferência NUMISHEET’93 por Makinouchi *et al.* (1993). Uma ilustração com as dimensões pode ser vista na Figura 8.

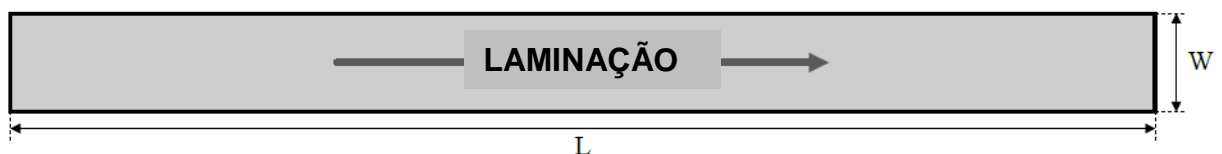
FIGURA 8 – DIMENSÕES DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO



Fonte: Adaptado de Makinouchi et al. (1993)

Chung *et al.* (2011) descrevem detalhadamente um “*benchmark problem*” proposto na conferência NUMISHEET 2011, indicado as dimensões dos corpos de prova, conforme pode ser observado na Figura 9. A espessura das chapas utilizadas neste trabalho é de 1,5mm.

FIGURA 9 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA PARA EMBUTIMENTO

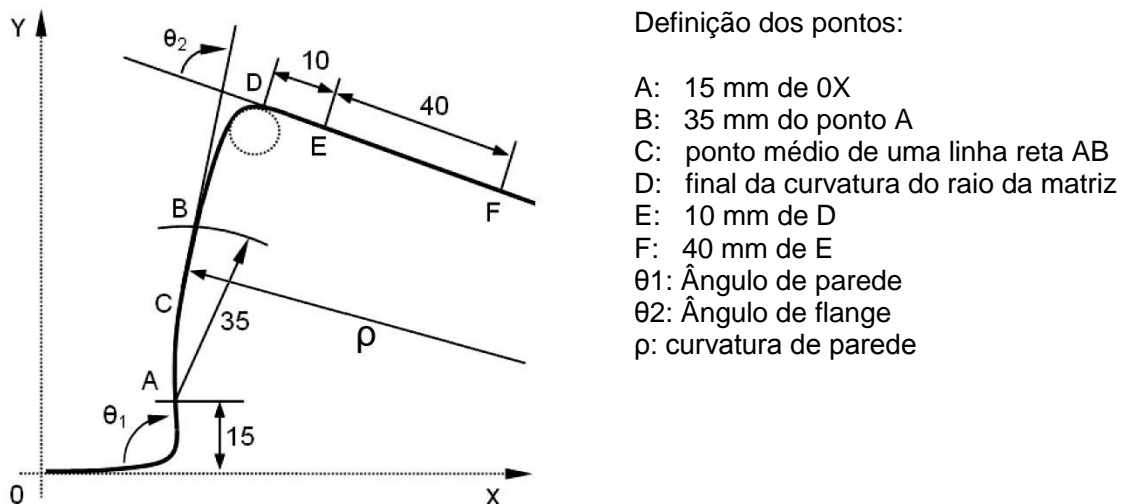


$$L = 300\text{mm} \quad W = 35\text{mm}$$

Fonte: Adaptado de Chung *et al.* (2011)

Após o embutimento do corpo de prova, a chapa plana assume a forma da ferramenta de estampagem formando um perfil chapéu similar ao da Figura 5 (vide pg. 24). A execução do embutimento possibilita a medição do retorno elástico através da avaliação geométrica dos corpos de prova, nas regiões indicadas na Figura 10.

FIGURA 10 - DEFINIÇÃO DAS REGIÕES DE MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO



Fonte: Adaptado de Makinouchi *et al.* (1993)

Para se realizar o ensaio experimental de embutimento é necessária uma prensa de duplo acionamento com capacidade de carga adequada ao material dos corpos de prova. Também é desejável que a prensa seja instrumentada para registrar a força e o deslocamento dos pistões. (Chemin Filho, 2011)

Quando aplicável, o aquecimento das amostras pode ser realizado por condução, por indução, ou em fornos de radiação com controle de variação de temperatura. Justifica-se a permanência da amostra sob aquecimento pelo tempo necessário para que a amostra alcance a mesma temperatura indicada pela regulação do forno. (Karbasián e Tekkaya, 2010; Chang *et al.*, 2011; Barouzeh e Mondali, 2011)

A medição das variáveis resposta do retorno elástico nas amostras conformadas pode ser realizada com o uso de um escâner e posterior comparação com o auxílio de um computador. A comparação da amostra com um padrão traçado em um programa de computador permite a mensuração da variação do ângulo de flange, ângulo de parede e raio de curvatura da parede e desta forma, caracterizar o retorno elástico. (Lajarin, 2012; Santos, 2013)

2.2.3 Ensaios de metalografia e microdureza

De acordo com Turreta (2008), na temperatura ambiente, os dois fatores que tem maior influência na conformabilidade são as características da chapa metálica e os estados de tensão aos quais a peça é submetida durante a operação. Entretanto, quando um aço é submetido à deformação plástica em elevadas temperaturas, fatores adicionais que afetam a conformabilidade devem ser considerados, a saber: a temperatura, a taxa de deformação e a evolução da microestrutura.

Quando a análise metalográfica não permite a distinção objetiva das microestruturas resultantes do processo de conformação, é possível se fazer a análise complementar através de ensaios de microdureza Vickers. (Button e Longhi, 2013)

Com base no trabalho de Naderi *et al.* (2008), pode-se considerar que durezas abaixo de 200HV representam microestruturas predominantemente ferríticas, durezas entre 200HV e 400HV representam microestruturas predominantemente bainíticas e acima de 400HV estruturas martensíticas.

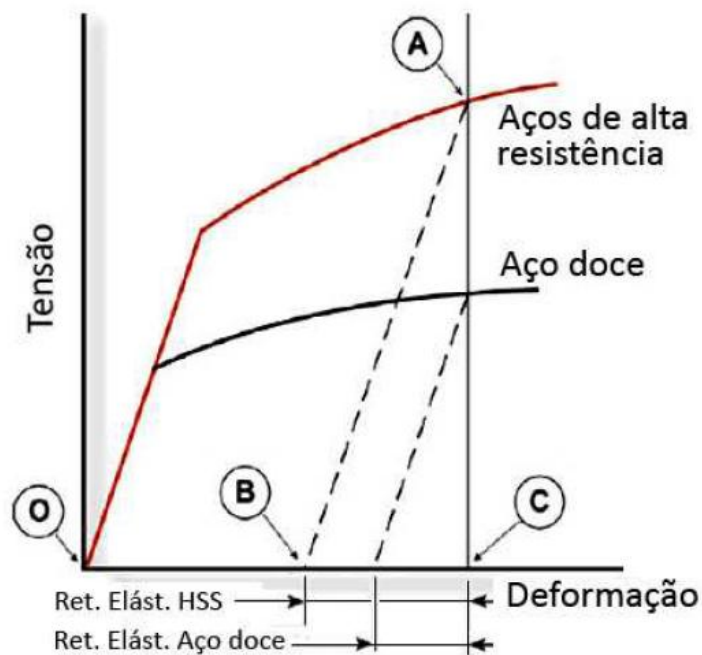
Portanto, com base na revisão bibliográfica, para avaliação experimental do retorno elástico foi considerada a descrição do “*benchmark problem*” proposto na conferência *Numisheet* 1993, com a adaptação da ferramenta de modo a permitir a realização dos ensaios de embutimento com variação da temperatura e controle da taxa de deformação. Para avaliação da evolução da microestrutura dos materiais ensaiados foi utilizada a técnica de microscopia ótica com avaliação complementar da microdureza (antes e depois das operações de embutimento).

Os parâmetros e o procedimento para execução dos experimentos práticos estão descritos com mais detalhes e ilustrados no Capítulo 3 que contém a metodologia e o planejamento experimental aplicado neste trabalho.

2.3 RETORNO ELÁSTICO APÓS OPERAÇÕES DE EMBUTIMENTO

A conformação dos aços avançados de alta resistência apresenta tensões elásticas residuais que são proporcionais ao seu limite de resistência. Ou seja, de uma maneira geral, quanto maior o limite de resistência do aço, maior será o retorno elástico da peça conformada, conforme pode-se observar na Figura 11.

FIGURA 11 – RETORNO ELÁSTICO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO



Fonte: WorldAutoSteel, Apud Lajarin (2012)

O retorno elástico ocorre após a remoção da carga aplicada pela ferramenta na conformação da chapa, resultando em desvio de forma do componente estampado. A sua magnitude pode ser descrita a partir do modelo de encruamento e pela geometria do componente e da ferramenta. (Lajarin, 2012; Santos, 2013)

Com o aumento da resistência do material, tornou-se possível produzir peças a partir de chapas mais finas, o que acentua ainda mais o efeito do retorno elástico. A tensão na chapa é o principal parâmetro determinante do retorno elástico. Outros fatores também contribuem tais como: raio da ferramenta, atrito de contato, espessura da chapa, temperatura, relação tensão deformação e taxa de deformação. (Keeler, 1994, Wagoner *et al.*, 2006; Verma e Haldar, 2007)

A indústria automobilística necessita de componentes de alta precisão geométrica e dimensional, devido ao fato da montagem automatizada e o atendimento ao controle de qualidade bastante severo. Por isto o retorno elástico é um problema grave na produção de componentes automotivos, e o conceito básico aplicado para sua diminuição é a redução da tensão na chapa durante a conformação. Também são aplicadas compensações nas formas das matrizes para acomodar o retorno elástico. (Gan e Wagoner, 2004; Wagoner *et al.*, 2013)

2.3.1 Retorno elástico nos aços de alta resistência

Devido à combinação de ductilidade e tensão limite de resistência, os aços de alta resistência estão sendo cada vez mais aplicados na fabricação de componentes estruturais dos automóveis. De acordo com a literatura pesquisada, várias empresas buscam eliminar os efeitos do retorno elástico por meio da compensação de parâmetros de processo e ajustes geométricos das ferramentas durante o processo de estampagem, na maioria das vezes baseados na experiência dos preparadores e também por tentativa e erro. (Luo e Ghosh, 2003; Keller, 1994; Keller, 2008; Kuwabara *et al.*, 2004; Wagoner *et al.*, 2006)

Lim *et al.* (2012) investigaram os parâmetros de influência no retorno elástico dos aços de alta resistência, principalmente a dependência com o tempo, para períodos de até dois anos após a descarga da conformação. Concluíram que as deformações características do retorno elástico podem variar ao longo do tempo.

Silva (2013) analisou o efeito da força pós dobra no retorno elástico em componentes dobrados em V. Concluiu que a geometria da ferramenta tem grande influência nas operações de estampagem e que o retorno elástico pode ser compensado com a aplicação de uma força posterior ao dobramento na região de curvatura do componente estampado.

Placidi *et al.* (2008) e Lajarin (2012) mencionam que até o momento, são poucas as alternativas disponíveis para solucionar o problema do retorno elástico. Uma delas consiste em alterar a forma final do componente, adequando-o para uma geometria que o torne menos susceptível ao retorno elástico.

Arcelor Mittal (2014) recomenda vários cuidados práticos tais como: projetar ferramentas com pequenos raios de ponta, criar reforços geométricos para aumentar a rigidez e planejar adequadamente a sequência de estampagem.

Vários autores fazem a comparação de seus resultados experimentais com os resultados de simulação numérica. Porém mencionam a existência de lacunas para aperfeiçoamento dos modelos teóricos e suas correspondentes aplicações nos modelos numéricos. (Akerstrom, 2006; Turreta, 2008; Karbasian e Tekkaya, 2010; Pelegrini, 2011; Bekar *et al.*, 2011).

Lajarin (2012) investigou a variação do módulo de elasticidade durante as operações de conformação. Aplicou métodos de simulação numérica pela análise de elementos finitos com uso de sub-rotinas, e concluiu que a previsão do retorno elástico através da simulação numérica é bastante complexa e ainda necessita de modelos fenomenológicos mais realistas.

Wagoner *et al.* (2013) afirmam que na previsão do retorno elástico a abordagem analítica por método de elementos finitos (MEF) assume a simplificação na geometria da ferramenta e nas propriedades dos materiais. Com uma extensa revisão bibliográfica, destaca que os mais recentes trabalhos tratam da previsão do empenamento de parede, retorno elástico em ligas de magnésio, modelos analíticos baseados no critério de escoamento de Hill e condições de tensões planas para dobramento em U e em V.

Finalizando seu estudo, Wagoner *et al.* (2013) relatam que, embora a capacidade de previsão do retorno elástico com o uso de ferramentas de simulação numérica tenha avançado significativamente nos últimos anos, existem parâmetros cuja influência deve ser melhor investigada, a citar: modelos constitutivos que considerem os diferentes estados de tensão, efeitos do atrito, efeitos da temperatura e novas tecnologias de estampagem, tais como as prensas servo controladas por comando numérico.

De acordo com Gorni (2008), outra sugestão é de realizar o processo de estampagem a quente. Por fim, Turreta (2008) e mais recentemente, Jeon *et al.* (2015) citam que ainda é insuficiente a informação técnica sistemática a respeito dos métodos de aquecimento e sua influência nos processos de conformação de chapas metálicas. Em seu trabalho buscaram relacionar a variação de dureza com a variação do retorno elástico em experimentos práticos e computacionais.

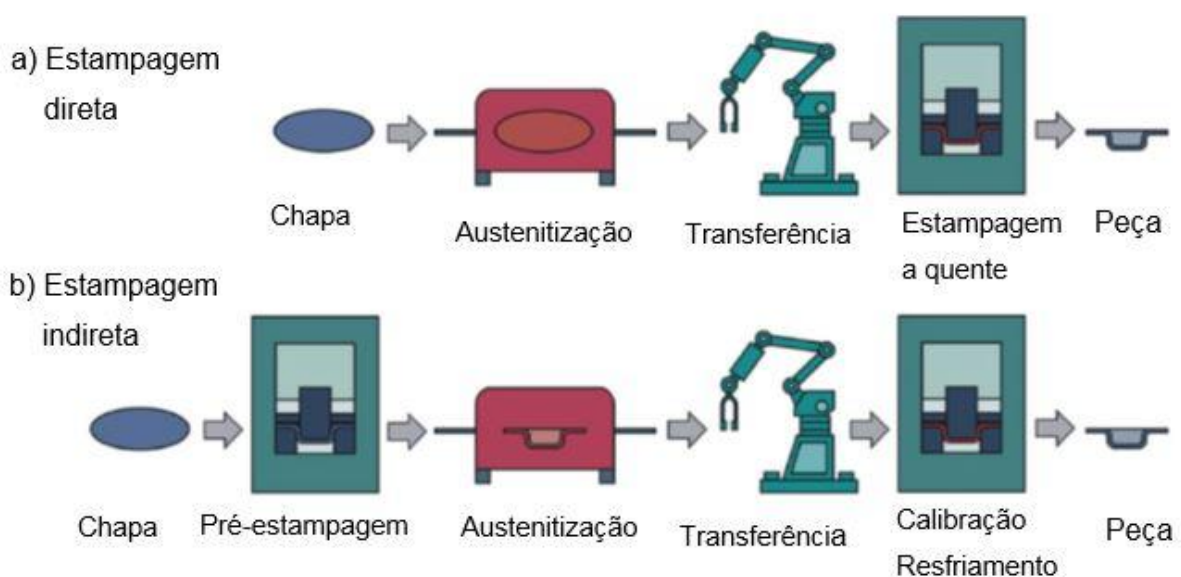
2.4 A TEMPERATURA NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

A melhoria da qualidade dos materiais não trouxe novos problemas para a indústria mecânica, mas acentuou os problemas existentes nos processos de fabricação sobretudo em relação a falhas no processo e ao controle dimensional dos componentes estampados. Conforme relata Tigrinho (2011), a estampagem efetuada em temperatura ambiente nos aços de alta resistência pode resultar em diferentes estados de tensões que podem levar à falha do material. Por outro lado, Lajarin (2012) aponta a possibilidade de variações de forma nos componentes estampados.

Ou seja, o embutimento realizado em temperatura ambiente em peças de aços de alta resistência, implica em grandes esforços de máquinas e ferramentas e promove altos níveis de tensão residual do processo que podem resultar em falha do componente estampado ou na deformação geométrica das peças. Como alternativa, Karbasian e Tekkaya (2010) relatam que uma alternativa para redução destes problemas pode ser o processo de estampagem a quente.

A Figura 12 contém uma ilustração de cada uma das variantes do processo, que pode ser realizado basicamente com duas variações, a saber: estampagem a quente direta e estampagem a quente indireta.

FIGURA 12 – VARIANTES DA ESTAMPAGEM A QUENTE: A) DIRETA B) INDIRETA

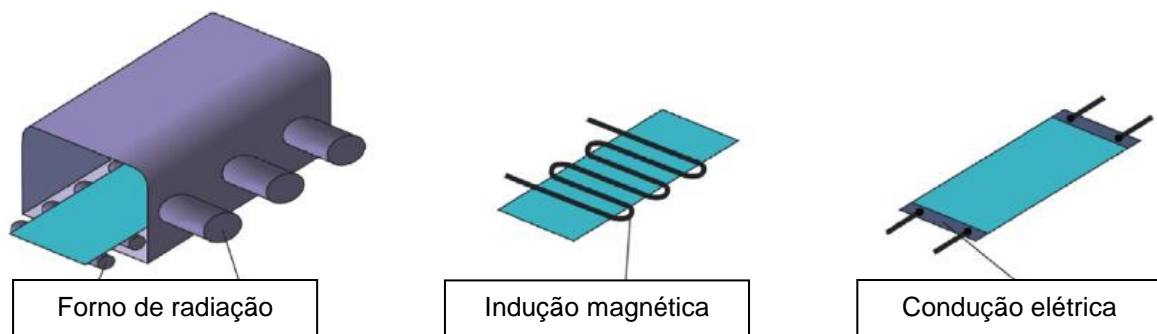


Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010)

2.4.1 Métodos de aquecimento das chapas para estampagem

O aquecimento da chapa pode ser realizado por diversos métodos entre os quais se destacam a transferência de calor pelos princípios de radiação, indução e condução, conforme pode ser visto na Figura 13. Karbasian e Tekkaya (2010) destacam que os tipos de aquecimento influenciam nas propriedades da peça, no tempo de processamento e na relação custo-benefício da estampagem e que a distribuição homogênea da temperatura e o tempo de aquecimento são as principais demandas dos sistemas de aquecimento.

FIGURA 13 – MÉTODOS DE AQUECIMENTO DAS CHAPAS PARA ESTAMPAGEM



Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010)

No aquecimento por radiação, a chapa é introduzida em um forno aquecido até que atinja a temperatura desejada. Na indução o aquecimento é obtido pela geração de um campo magnético induzido. No fenômeno da condução a chapa é presa entre um ou mais pares de eletrodos que permitem a passagem de uma corrente elétrica pela peça e o aquecimento ocorre por efeito Joule. Mais detalhes sobre os métodos de aquecimento podem ser encontrados nos trabalhos de Mori *et al.* (2005), Turreta (2008), Kolleck *et al.*, (2008) e Souza (2013)

O método de aquecimento deve possibilitar a distribuição homogênea do calor na chapa, e isto é conseguido pela manutenção da temperatura durante um determinado tempo que pode variar de 2 min até 15 min, dependendo do método de aquecimento, do tamanho do componente estampado, da temperatura desejada e do material da peça. (Chang *et al.*, 2011; Barouzeh e Mondali, 2011; Souza, 2013).

Hoffman e Steinbeiss (2007) citam ainda que a ferramenta deve ser mantida abaixo dos 200 °C para permitir as mudanças do material na estampagem a quente. Para retirar o calor do processo podem ser utilizados sistemas de refrigeração da peça estampada e da ferramenta.

A realização de estampagem a quente também implica na utilização de materiais refratários para a confecção de ferramentas e equipamentos especiais para manipulação das peças. A manipulação de materiais em altas temperaturas pode oferecer riscos de acidentes adicionais aos operadores do processo.

A otimização do processo de estampagem a quente é bem mais complexa do que a estampagem na temperatura ambiente e requer conhecimento profundo do comportamento do material e fenômenos de interface em altas temperaturas. De acordo com Turretta (2008) e Jeon *et al.* (2015) a informação técnica sistemática sobre os métodos de aquecimento e preparação de máquinas para realização dos processos de conformação a quente ainda é insuficiente.

2.4.2 Estudos de operações de estampagem com controle de temperatura

Turretta (2008) investigou as propriedades micro estruturais, mecânicas e térmicas de aços temperáveis de alta resistência em operações de estampagem a quente. Os aços testados por Turretta apresentaram alta conformabilidade e baixo retorno elástico na estampagem a quente. Este autor também propõe uma nova abordagem para descrever os fenômenos que afetam o material, o processo e o produto na estampagem a quente. Isto inclui um procedimento experimental para determinar as CLC em temperaturas elevadas em condições isotérmicas.

Karbasian e Tekkaya (2010) fazem uma revisão sobre o processo de estampagem a quente em componentes de aço de alta resistência, sob o ponto de vista térmico, mecânico, microestrutural e tecnológico. Apontando para algumas lacunas em aberto, os autores indicam grande potencial para pesquisa sobretudo nas áreas de transformação de fase, comportamento de fluxo contínuo, correlação entre propriedades mecânicas e geométricas

Pellegrini (2012) estudou a estampagem a quente sob aspecto térmico e reológico: a avaliação da conformabilidade do material e o estudo da evolução térmica da chapa sob a matriz. Ela aponta que os testes de Nakajima e Marciniak não

levam em conta a temperatura da chapa e sua influência nas propriedades do material. Por isto, Pellegrini propõe um equipamento específico para realizar o teste de Nakajima em altas temperaturas. Também relata que a maioria dos estudos atuais busca promover uma estrutura completamente martensítica no final da estampagem. Seu trabalho colabora no estudo das faixas de resfriamento factíveis atualmente. Por fim, desenvolve dois modelos analíticos que buscam descrever os resultados experimentais.

Button e Flandoli (2010) estudaram a estampagem a quente com resfriamento direto para melhoria das propriedades mecânicas do aço 22MnB5. Nesta pesquisa, o método de elementos finitos foi utilizado para determinar as melhores condições de estampagem de uma certa peça. Em seguida, conduziram experimentos com variação e controle da temperatura de processo. As peças produzidas foram testadas e analisadas. Os resultados indicaram a melhoria da qualidade das peças estampadas a quente, quando comparadas com peças estampadas a frio.

Os estudos avançados sobre os aços AHSS privilegiam o desenvolvimento do aço 22MnB5 que pode apresentar uma estrutura totalmente martensítica após a têmpera no interior da matriz do processo de estampagem a quente. Alguns autores, tais como Button e Longhi (2013) promovem ainda estudos em chapas constituídas de dois ou mais materiais diferentes com o intuito de desenvolver componentes estruturais com resistências distintas para cada região do componente estampado.

Na estampagem realizada em altas temperaturas, o processo de austenitização e o posterior resfriamento rápido controlado é o que permite a obtenção de estruturas metalúrgicas de base martensítica que promovem o aumento da resistência do componente estampado.

Para temperaturas intermediárias, Yanagimoto e Oyamada (2005) testaram analiticamente e experimentalmente os aços de alta resistência e relataram que a partir da temperatura de estampagem de 750K (cerca de 477°C) já é possível observar uma redução significativa do retorno elástico.

Mori *et al.* (2005) realizaram ensaios de dobramento de um perfil chapéu variando a temperatura desde 25°C até 800°C com aquecimento por resistência em chapas de aços de ultra alta resistência. Concluíram que o aumento da temperatura contribuiu na redução do retorno elástico. Além disso, o aquecimento por resistência é rápido e evita a redução da temperatura e a oxidação na estampagem.

Ozturk *et al.* (2009) realizaram testes de tração nos aços DP600 em diferentes temperaturas, variando desde 25°C até 300°C com corpos de prova retirados da chapa em diferentes orientações em relação à direção de laminação. Concluíram que o comportamento do material no que diz respeito ao retorno elástico é complexo e dependente da variação de temperatura, mesmo para temperaturas abaixo do ponto de austenitização.

Souza (2013), cita que a supressão do retorno elástico na estampagem a quente é frequentemente associada à austenitização, mas que, entretanto, o mecanismo responsável por este efeito ainda não é plenamente conhecido.

Jeon *et al.* (2015) fabricaram um dispositivo especial para aquecimento, controle de temperatura e resfriamento de corpos de prova durante ensaios de embutimento. Como principais resultados buscaram estabelecer uma associação da temperatura de conformação com o retorno elástico e a variação da dureza resultante em corpos de prova embutidos. Por fim, compararam seus resultados com um modelo de simulação numérica.

2.5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS NOS PROCESSOS DE ESTAMPAGEM

A análise por método de elementos finitos (MEF) é amplamente utilizada na engenharia, para solução de sistemas de equações lineares e não lineares, inclusive nas operações de conformação. A sua aplicação busca a redução de custos no desenvolvimento de ferramentas de estampagem e têm contribuído muito para a redução de tempo e custos de desenvolvimento das ferramentas de estampagem. (Andersson, 2005)

Uma das limitações de aplicação dos métodos numéricos nos processos de estampagem está associada à dificuldade de descrever computacionalmente o comportamento mecânico dos materiais. Vários fenômenos não lineares resultantes de alterações da microestrutura do material que podem ocorrer durante a deformação plástica ainda não são bem descritos por aproximações e equações constitutivas convencionais. Isto é mais evidente na estampagem dos aços avançados de alta resistência. (Placidi *et al.*, 2008)

Dois fenômenos em específico são apontados como os principais causadores da não linearidade do comportamento desses aços: a variação do módulo de elasticidade com a deformação plástica e o efeito *Bauschinger*. (Placidi *et al.*, 2008)

De acordo com Lajarin (2012) a preparação de um modelo numérico para análise de conformação de chapas metálicas implica na escolha de um modelo físico do comportamento elasto-plástico apropriado do material. Geralmente, a modelagem do material pode ser dividida em duas partes: uma que descreve o estado de tensão no escoamento inicial do material (função de escoamento plástico) e uma que descreve o quanto a função do escoamento se desenvolve durante a deformação plástica (lei de encruamento).

2.5.1 Função de escoamento e modelo de encruamento

Uma função de escoamento pode ser definida como uma superfície no espaço de tensões multiaxiais. Geralmente, na análise de conformação de chapa metálica são considerados apenas os vetores de tensão atuantes do plano da chapa. Os demais vetores são assumidos como zero e, desta forma, o critério de escoamento é formulado no espaço de tensões planas ou bidimensional. (Meinders *et al.*, 2006)

A função de escoamento plástico usada em análise numérica é um dos fatores que tem significativa influência na descrição do estado interno final de tensões de um componente deformado plasticamente. A aplicação de diferentes funções de escoamento plástico pode resultar em diferentes formas de previsão do retorno elástico. (Laurent *et al.*, 2008)

Um modelo de encruamento serve para descrever a evolução da superfície de escoamento do material devido a deformação plástica. Entretanto, os modelos simples de encruamento não conseguem descrever com precisão o comportamento do material sob variação na trajetória de deformação. Para melhorar a previsão do efeito de retorno elástico em chapas metálicas é necessário o uso de modelos de encruamento que sejam capazes de descrever os efeitos das mudanças de trajetória na deformação. (Li *et al.*, 2002; Wagoner e Geng, 2002)

Aumentos uniformes da superfície de escoamento podem ser descritos como encruamento isotrópico (*isotropic hardening*). Neste caso, o centro da superfície é fixo e seu formato permanece inalterado, mas a superfície expande. Mudanças irregulares

na superfície de escoamento podem ser descritas usando um encruamento cinemático (*kinematic hardening*). Neste caso a expansão da superfície é irregular e pode sofrer inclusive mudanças de forma. Isto significa que a previsão do retorno elástico é fortemente dependente do material da peça e do modelo de encruamento usado na análise numérica. (Burchitz, 2008)

Lajarin (2012) explica que a magnitude do retorno elástico é influenciada pelo modelo de encruamento e também pela geometria do componente e da ferramenta. Quando a geometria do componente estampado impede o relaxamento completo das tensões elásticas durante o descarregamento, as tensões mantidas no componente são chamadas de tensões residuais. Como resultado, o material oferece resistência a essas tensões residuais e o componente tem sua forma geométrica alterada. Se todas as tensões elásticas não puderem ser relaxadas durante a estampagem, padrões geométricos podem ser criados para ajudar na distribuição uniforme das tensões através da espessura da chapa.

Para as operações de conformação a quente, pode-se utilizar o modelo de *Hensel-Spittel* que descreve o comportamento do material a partir dos coeficientes determinados com base nos resultados de ensaios tração. (Batalha, 2015)

A velocidade de embutimento também foi objeto de investigação de pesquisadores e tem o seu valor expresso em função da espessura da chapa a ser embutida. Neste contexto, cabe citar o trabalho de Madi *et al.* (2016) que fizeram um estudo de influência da velocidade de estampagem no limite de conformabilidade.

2.5.2 Experimentos computacionais e o retorno elástico

Asgari *et al.* (2008) afirmam que o método de análise por elementos finitos já é bastante eficiente para prever o fenômeno do retorno elástico em aços convencionais, mas não tem apresentado resultados satisfatórios na previsão com aços AHSS.

De acordo com Lajarin (2012), a microestrutura diferenciada dos aços AHSS gera durante a deformação plástica um comportamento que ainda não é totalmente conhecido. Por isso a caracterização precisa do comportamento do material no aplicativo de simulação é peça fundamental para o sucesso na previsão do fenômeno do retorno elástico.

Bao *et al.* (2013) realizaram experimentos para determinar a relação entre os parâmetros geométricos das ferramentas e as condições de processo com objetivo de verificar sua influência no retorno elástico.

Os modelos de encruamento anisotrópicos baseados em deslocamento são mais adequados para descrever os fenômenos observados nas operações de conformação. Neste contexto, Lajarin (2012) faz uma extensa revisão sobre os principais autores de trabalhos de simulação numérica com modelos de encruamento anisotrópico associados ao retorno elástico. Cita ainda que o aplicativo ABAQUS® dispõe uma função de escoamento de Von Mises para definir escoamento isotrópico, e uma função de escoamento de Hill'48 que pode ser usada para definir um escoamento anisotrópico. Descreve que algumas funções mais modernas para representação dos materiais podem ser implementadas no ABAQUS® apenas com o auxílio de sub-rotinas.

2.5.3 Simulação de estampagem a quente

Akerstron (2006) propõe um modelo da conformação termomecânica de componentes estampados a quente de chapas finas de aços de ultra alta resistência ao Boro. Seus resultados descrevem com acurácia a geometria final da peça, a variação da espessura no componente estampado e a sua distribuição de dureza.

Silva *et al.* (2010) relatam o uso do programa LS-DYNA para análise pelo método de elementos finitos em operações de estampagem a frio. Kusumi *et al.* (2013) relatam o uso do programa LS-DYNA para simulação de estampagem a quente.

Karbasian e Tekkaya (2010) fazem uma revisão bem detalhada sobre as equações constitutivas propostas por vários autores para descrever os estados de tensões decorrentes da estampagem a quente, e dos fenômenos térmicos, dividindo a análise em duas partes: um modelo mecânico e outro térmico que são consolidados com o uso de programas específicos, a exemplo do LS-DYNA, AUTOFORM e PAMSTAMP. Com o uso destes programas, as ferramentas de estampagem podem ser modeladas como corpos rígidos com comportamento térmico.

Em seus estudos, Souza (2013) apresenta os resultados dos experimentos computacionais realizados com o LSDYNA® são comparados com experimentos

práticos. Ele também descreve em detalhes a simulação numérica de componentes estampados a quente, partindo das equações constitutivas propostas por vários autores, com ajustes de parâmetros propostos por Akerstron (2006). Conclui em seu trabalho que os modelos numéricos para análise por elementos finitos devem ser ajustados com base nos modelos teóricos considerando fatores mecânicos, térmicos e metalúrgicos. Este ajuste é feito com o auxílio dos resultados obtidos a partir dos experimentos práticos.

Em outra abordagem para realização de experimentos computacionais, pode-se destacar o trabalho de Naderly (2007) que compara os resultados dos experimentos computacionais realizados com o ABAQUS® com os resultados experimentais e descreve em detalhes as propriedades das peças estampadas a quente. Lee *et al.* (2009) descrevem o uso do programa ABAQUS com a sub-rotina UMAT para implementar a transformação de plasticidade induzida em experimentos computacionais de um processo de conformação a quente.

Lajarin (2012) descreve a aplicação do programa ABAQUS® em suas simulações detalhando o tipo e tamanho dos elementos, as condições de contato, os métodos de descarregamento, esquema do tempo de integração, número de pontos de integração na espessura da chapa e velocidade de punção para simulação de operações de estampagem de um perfil chapéu típico para estudo do retorno elástico.

Batalha (2015) descreve a aplicação do modelo de *Hensel-Spittel* com o auxílio do programa FORGE® para simulação de operações de estampagem a quente. Relatou que este modelo, bem calibrado com base em dados experimentais, pode possibilitar a previsão do comportamento dos materiais durante as operações de estampagem a quente.

Yang *et al.* (2016) relatam a aplicação do programa DEFORM® para simulação do retorno elástico obtido em peças dobradas. Em seu trabalho concluem que a variação do módulo de elasticidade do material e a relação entre tensão e deformação necessitam de modelos complexos para a representação correta das operações de conformação nos programas de simulação numérica.

2.6 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO RETORNO ELÁSTICO

Concluindo, conforme apresentado sucintamente na revisão bibliográfica, vários autores descrevem em detalhes a necessidade de realização de experimentos práticos para avaliação das características dos materiais utilizados nas operações de estampagem. Os efeitos do retorno elástico são comumente avaliados através de ensaios pelo *benchmark problem* proposto na conferência *Numisheet*. Os ensaios complementares de metalografia e microdureza são frequentemente realizados para levantamento da microestrutura resultante em componentes estampados.

Vários modelos fenomenológicos foram propostos para explicação do retorno elástico observado nos componentes estampados, constituídos por diferentes funções de escoamento e modelos de encruamento. Vários autores estudaram como as variações nos parâmetros de processo podem reduzir o retorno elástico.

A estampagem a quente ainda carece de informação técnica sistemática a respeito dos métodos de aquecimento e sua influência nos processos de conformação de chapas metálicas. O material de construção mecânica mais presente nos artigos pesquisados sobre estampagem a quente é o aço 22MnB5. Outros aços de alta resistência são mais estudados nas condições de estampagem a frio.

Vários autores fazem uso da análise por elementos finitos com o intuito de validar modelos de simulação numérica que permitam prever em ensaios computacionais o comportamento das peças após as operações de conformação.

De uma forma resumida, o conjunto destas obras pode ser considerado como o atual estado da arte em relação ao estudo da influência da temperatura no retorno elástico, a saber: a realização de experimentos práticos controlados e a realização de experimentos computacionais com o intuito de estabelecer relações de causa e efeito.

Resta uma lacuna no estudo da influência da temperatura de embutimento no retorno elástico de peças nos aços HSLA350/440 e DP350/600. Esta lacuna pode ser preenchida com o estudo destes materiais aplicando o conjunto das abordagens identificadas na revisão bibliográfica, que é justamente o escopo do presente trabalho.

Para isto, no capítulo a seguir está detalhada a metodologia e o planejamento para realização de experimentos práticos e computacionais que permitam a melhor compreensão sobre como as condições de temperatura influenciam no retorno elástico de peças embutidas em aços de alta resistência.

3 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Conforme foi identificado na revisão bibliográfica, a metodologia apresentada a seguir tem o objetivo de investigar a influência da temperatura de embutimento no retorno elástico através de experimentos práticos e experimentos computacionais. O fluxograma ilustrado na Figura 14 representa esquematicamente as duas abordagens e o fluxograma com as principais etapas do trabalho.

FIGURA 14 - FLUXOGRAMA COM AS ETAPAS DO TRABALHO



A abordagem dos experimentos práticos buscou identificar as características dos materiais ensaiados e reproduzir as condições operacionais de execução das operações de embutimento no ambiente de laboratório. Para isto, foram realizados ensaios de tração com corpos de prova aquecidos em diversas temperaturas, conforme a indicação da revisão bibliográfica. Uma série de corpos de prova foi submetida ao processo de embutimento conforme o *benchmark problem* descrito na Numisheet 1993. Foi realizada a análise metalográfica e microdureza nos corpos de prova antes da operação de embutimento e após a medição do retorno elástico.

A abordagem dos experimentos computacionais buscou a construção de um modelo computacional fundamentado nos conceitos teóricos sobre o retorno elástico, utilizando o modelo de escoamento de *Hensel-Spittel*, também descritos na revisão bibliográfica. Em seguida, foram realizados ensaios de simulação numérica utilizando como referência os dados obtidos a partir do modelo de escoamento de *Hensel-Spittel* parametrizado com a base de dados composta pelos resultados dos experimentos práticos.

Na última instância os resultados experimentais do retorno elástico foram comparados com os resultados computacionais. Com esta metodologia foi possível investigar influência da temperatura de embutimento no retorno elástico em aços de alta resistência.

A seguir, estão descritos os detalhes de cada etapa do trabalho, os equipamentos utilizados, os parâmetros de ensaio e controle.

3.1 EXPERIMENTOS PRÁTICOS

A primeira abordagem do trabalho consiste na execução de experimentos práticos para levantamento das características dos materiais, através de ensaios de tração e experimentos práticos de embutimento para avaliação do retorno elástico. Os materiais a serem ensaiados foram o aço de alta resistência HSLA350/440 e o aço avançado de alta resistência DP350/600, fornecidos pela empresa Arcelor Mittal.

3.1.1 Ensaios de tração com controle de temperatura

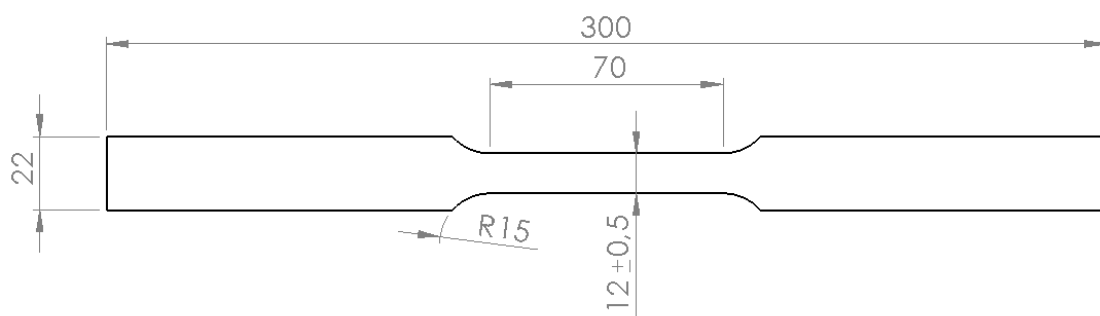
Para realizar estes ensaios de tração com controle de temperatura e da taxa de deformação foi utilizado um equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos do Laboratório de Conformação Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A máquina do fabricante MTS, modelo 810-FlexTest 40, cuja ilustração pode ser observada na Figura 15, tem capacidade de 100kN, e permite realizar os ensaios de tração com o controle da temperatura, controle da taxa de aquecimento e de resfriamento, controle do tempo de homogeneização e também permite o controle da taxa de deformação.

FIGURA 15 – EQUIPAMENTO SERVO-HIDRÁULICO PARA ENSAIOS MECÂNICOS.



Para realização dos ensaios de tração, os corpos de prova (CDP) foram fabricados de acordo com a norma ASTM E8M-03, referente a ensaios de tração, e ASTM E21-05 usado como complemento para caso de ensaio a quente, de acordo com as dimensões ilustradas na Figura 16.

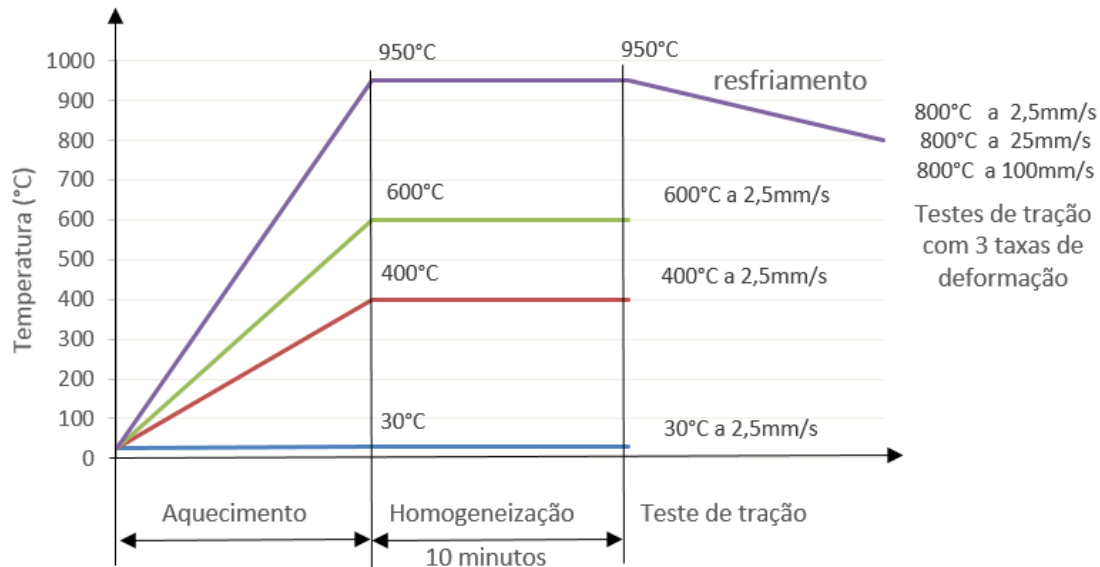
FIGURA 16 - CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



A condição de acabamento geral dos corpos de prova para ensaios de tração deve resultar em rugosidade média (R_a) de $3,2\mu\text{m}$ e tolerância geral linear de $\pm 0,1\text{mm}$, sendo utilizado processo de lixamento para remover as regiões oxidadas da superfície.

De acordo com as recomendações da revisão bibliográfica, foram escolhidas das quatro temperaturas de ensaio (30°C, 400°C, 600°C, e 800°C) e três velocidades de ensaio (2,5mm/s, 25mm/s e 100mm/s), conforme ilustrado na Figura 17.

FIGURA 17 - CURVAS DE AQUECIMENTO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



Os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de ensaio e homogeneizados por 10min. Para as temperaturas de 30°C, 400°C e 600°C, os ensaios de tração foram executados considerando a velocidade de ensaio 2,5mm/s.

Para os ensaios de tração com a temperatura de 800°C, os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de 950°C, homogeneizados por 10min e depois resfriados lentamente até a temperatura de ensaio. Para esta temperatura foram realizados ensaios com velocidades de ensaio de 2,5mm/s, 25mm/s e 100mm/s, com o propósito de investigar a sensibilidade dos materiais à taxa de deformação para os ensaios em altas temperaturas.

Também os materiais foram ensaiados em três diferentes direções em relação à direção de laminação, a saber: 0°, 45° e 90°, com o propósito de investigar as condições de anisotropia do material em elevadas temperaturas.

Nos ensaios de tração, cada corpo de prova foi aquecido e testado individualmente, com pelo menos uma repetição para comprovar os resultados. Os valores de tensão e deformações observadas nos corpos de prova foram monitorados e registrados por um computador, em seguida foram analisados com o auxílio de uma planilha eletrônica.

3.1.2 Experimentos práticos de embutimento

A segunda fase da prática experimental da pesquisa buscou reproduzir as condições de serviço industriais. Nesta etapa os experimentos práticos de embutimento foram realizados utilizando os recursos do Laboratório de Conformação (LABCONF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para isto foi utilizada uma prensa, que pode ser observada na Figura 18, que permite o monitoramento da força e do deslocamento através de um controlador eletrônico.

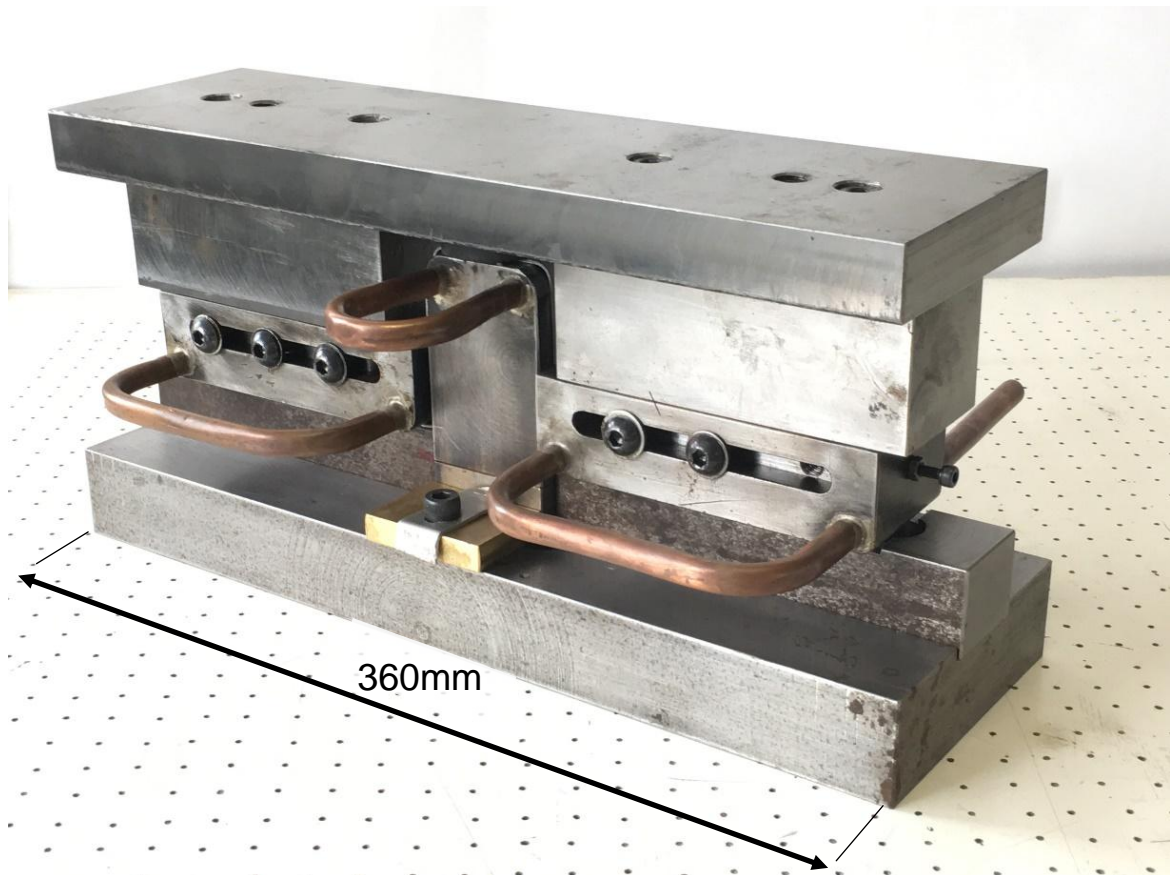
FIGURA 18 – PRENSA HIDRÁULICA PARA OS EXPERIMENTOS PRÁTICOS



Esta prensa tem acionamento hidráulico com dois pistões. Um pistão é utilizado para acionamento do prensa-chapas e outro pistão para acionamento do punção com movimento em sentido oposto, ambos com pressão regulável até 200bar. Também é possível regular a velocidade de deslocamento através de uma válvula hidráulica de controle de fluxo. Assim é possível realizar a operação de embutimento no perfil chapéu com uma ferramenta que permite reproduzir o problema do retorno elástico.

Os experimentos práticos de embutimento foram realizados com o uso de uma ferramenta adaptada para ensaios a quente construída com base no *benchmark problem* proposto por Makinouchi *et al.* (1993), ilustrada na Figura 19.

FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO

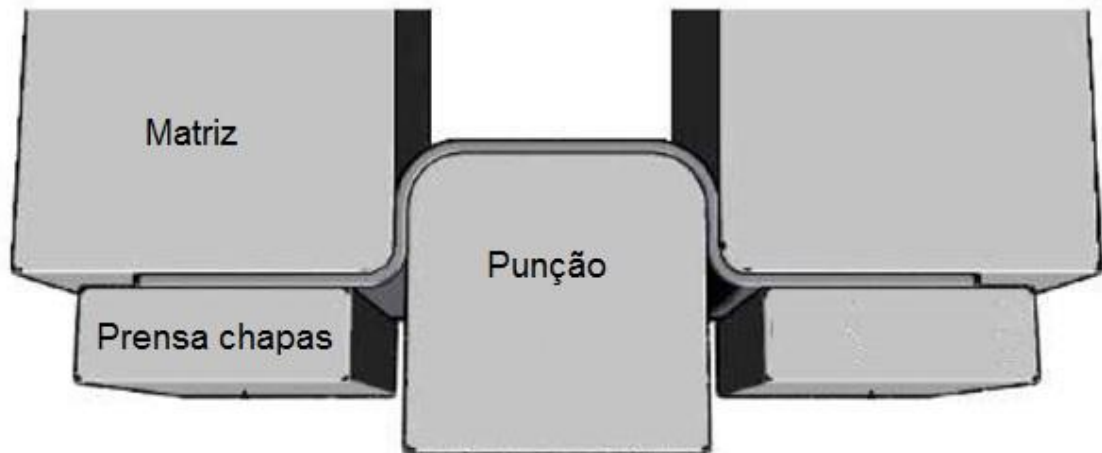


Esta ferramenta permite embutir peças em perfil chapéu próprias para análise do retorno elástico, conforme a proposta de Makinouchi *et al.* (1993).

Para execução dos experimentos práticos foram ensaiadas chapas dos aços HSLA350/440 e DP350/600 com dimensões de 35mm x 300mm cortadas no comprimento alinhado com a direção de laminação, conforme a recomendação de Chung *et al.* (2011), ilustrada na Figura 9, no capítulo da revisão bibliográfica.

Durante os experimentos práticos, a matriz empurra a chapa do corpo de prova contra o prensa-chapas até atingir a pressão de regulagem. No segundo estágio, o punção empurra a chapa para dentro da matriz, conforme pode ser observado na Figura 20 efetuando um deslocamento de 70 mm e retorna deixando a chapa conformada dentro da matriz, buscando reproduzir o problema do retorno elástico.

FIGURA 20 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE EMBUTIMENTO



A força aplicada pela matriz sobre o corpo de prova contra o prensa-chapas tem o objetivo de dificultar o escorregamento da chapa para dentro da matriz, e pode ser regulada diretamente na unidade hidráulica da prensa, com o auxílio de um manômetro indicador de pressão, conforme pode ser observado na Figura 21.

FIGURA 21 – RELÓGIO INDICADOR DA PRESSÃO DO PRENSA CHAPAS



A força do prensa chapas é apontado como um fator de processo de grande influência no retorno elástico. Considerando ensaios em temperatura ambiente, para os experimentos práticos de embutimento conforme o *benchmark problem* proposto

na *Numisheet'93*, os níveis de controle recomendados pela revisão bibliográfica são 2,5kN e 12,5kN. (Chen e Koç, 2007; Chemin Filho, 2011; Lajarin, 2012).

Ensaio preliminares de embutimento com o aquecimento das amostras resultaram no rompimento de vários corpos de prova quando o prensa chapas foi regulado para pressões acima de 200psi. Isto impossibilitou realizar os experimentos práticos de embutimento com variação da força de prensa chapas, conforme o descrito por Chemin Filho (2011) e Lajarin (2012). Devido aos resultados dos ensaios preliminares realizados neste trabalho procurou-se manter o prensa chapas regulado para 200psi.

A temperatura é um dos fatores de investigação mais complexos envolvidos nas operações de conformação. Com base nos resultados práticos publicados foram selecionados três níveis deste fator (Mori et al., 2005; Yanagimoto e Oyamada, 2005; Barouzeh e Mondali, 2011). O aquecimento das amostras foi realizado em um forno elétrico da marca ZEZIMAC, modelo 2000, com potência de 6400W e capacidade de aquecimento até a temperatura de 1200°C, conforme ilustração da Figura 22.

FIGURA 22 – FORNO PARA AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS



Durante o aquecimento, dentro do forno, os corpos de prova foram envolvidos em uma manta de carbono, para evitar a oxidação e corrosão. A transferência dos

corpos de prova aquecidos para a ferramenta de embutimento foi feita manualmente com o auxílio de um tenaz.

A temperatura dos corpos de prova dentro do forno e durante os ensaios de embutimento foi controlada com o auxílio de um termopar e um termômetro digital, ilustrados na Figura 23.

FIGURA 23 – TERMOPAR E TERMÔMETRO DIGITAL



O resfriamento das amostras embutidas foi realizado com auxílio de um sistema de refrigeração, ilustrado na Figura 24 e não foi controlada a taxa de resfriamento. Os corpos de prova não receberam tratamento térmico depois do embutimento e foram identificados com o auxílio de uma caneta tipo marca texto de tinta permanente.

FIGURA 24 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO



Ensaio preliminares na temperatura de 800°C resultaram em corpos de prova geometricamente instáveis e de difícil manuseio. Por se tratar de chapas finas, para 800°C, não foi possível manter geometria plana dos corpos de prova durante a movimentação do forno e posicionamento na ferramenta de embutimento. Os corpos de prova aquecidos a 800°C apresentaram empenamento dentro do forno e instabilidade geométrica durante a movimentação, o que resultou demora no posicionamento na matriz para a operação. Devido ao elevado tempo de posicionamento, os corpos de prova resfriaram de maneira irregular na ferramenta, antes da operação de embutimento.

Após este resfriamento prematuro e irregular, todos os corpos de prova aquecidos a 800°C foram rompidos durante a operação de embutimento. Por isto, a avaliação do retorno elástico para a temperatura de 800°C nos corpos de prova embutidos não foi possível. Devido a este problema, a temperatura de ensaio para os experimentos práticos que resultou em peças embutidas sem rompimento foi limitada ao valor de 600°C.

Na prensa hidráulica utilizada neste trabalho, o controle de velocidade é feito por um computador que monitora o deslocamento e o tempo correspondente, e a regulação é feita através de uma válvula hidráulica de controle de fluxo.

Foram realizados experimentos práticos de embutimento nas velocidades de 2,5mm/s e 15mm/s, sendo estes os valores comuns na prática industrial. A prensa permite a regulação do deslocamento do punção somente até a velocidade de 15mm/s e, por isto, não foi possível realizar os ensaios de embutimento nas velocidades de 25mm/s e 100mm/s.

Desta forma, os fatores de controle e seus respectivos níveis para os experimentos práticos de embutimento foram escolhidos primeiramente com base nas indicações da revisão bibliográfica e, em seguida, com base nas restrições verificadas nos resultados dos ensaios preliminares de embutimento. Desta forma, foram respeitadas as condições experimentais disponíveis em laboratório, com o intuito de permitir o estudo experimental prático da influência da temperatura de embutimento em aços de alta resistência, sendo que os valores de regulagens podem ser observados nas tabelas apresentadas a seguir.

3.1.3 Parâmetros dos ensaios experimentais de embutimento

Para avaliar a influência da temperatura de embutimento no retorno elástico é necessário promover experimentos práticos com diferentes temperaturas e diferentes taxas de deformação. Para isto, o tipo de experimento prático adotado foi o fatorial completo com dois fatores de controle sendo o primeiro com três níveis de controle, e o segundo fator com dois níveis de controle conforme descrito da Tabela 2.

TABELA 2 – FATORES DOS EXPERIMENTOS DE EMBUTIMENTO E NÍVEIS DE CONTROLE

Fator	Descrição	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Temperatura	30 ^o C	400 ^o C	600 ^o C
B	Velocidade de punção	2,5mm/s	15mm/s	-

O experimento fatorial completo requer a execução de todas as combinações possíveis entre os fatores analisados e, para isto, foram arranjadas em 12 rodadas experimentais, conforme pode ser observado na Tabela 3. Para cada rodada foram realizadas três repetições totalizando o embutimento de 36 corpos de prova.

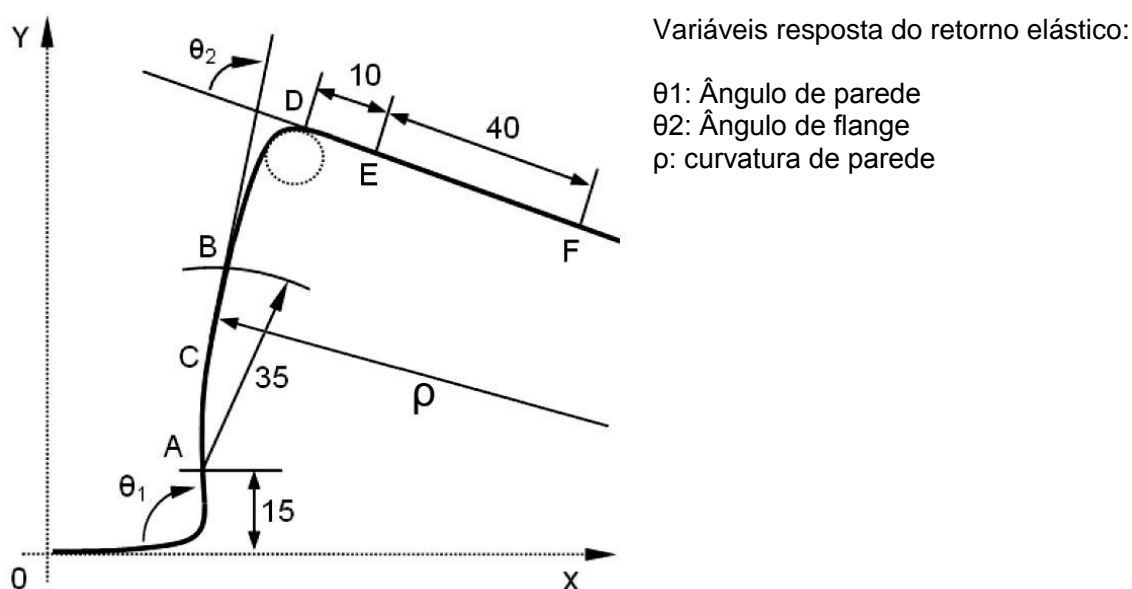
TABELA 3 – RODADAS EXPERIMENTAIS COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Rodada	Fator A Temperatura (^o C)	Fator B Velocidade de punção (mm/s)	MATERIAL
1	30	2,5	HSLA350/440
2	400	2,5	HSLA350/440
3	600	2,5	HSLA350/440
4	30	2,5	DP350/600
5	400	2,5	DP350/600
6	600	2,5	DP350/600
7	30	15	HSLA350/440
8	400	15	HSLA350/440
9	600	15	HSLA350/440
10	30	15	DP350/600
11	400	15	DP350/600
12	600	15	DP350/600

3.1.4 Medição do retorno elástico nos corpos de prova

As variáveis-resposta a serem medidas para controle do retorno elástico dos ensaios experimentais foram os mesmos utilizados no problema *benchmark problem* proposto na conferência Numisheet (1993), a saber: ângulo de parede (θ_1), ângulo de flange (θ_2) e raio de curvamento da parede (ρ), conforme ilustrado na Figura 25 e descrito na Tabela 4. De forma complementar, a espessura da peça embutida pode ser medida com o auxílio de um micrômetro de ponta abaulada.

FIGURA 25 – VARIÁVEIS DE RESPOSTA DO RETORNO ELÁSTICO



Fonte: Adaptado de Makinouchi *et al.* (1993)

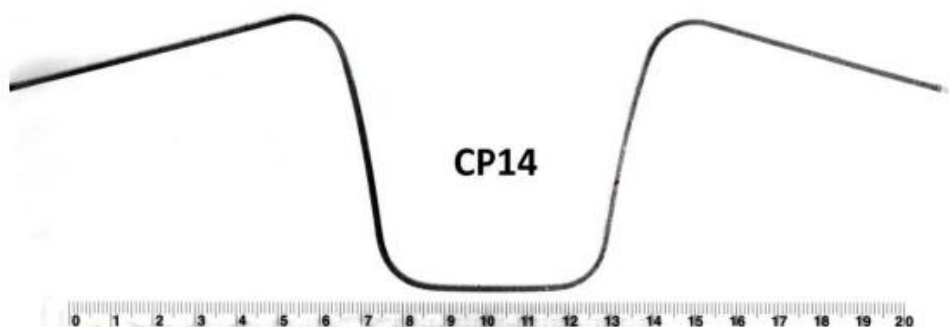
TABELA 4 – VARIÁVEIS RESPOSTA DO RETORNO ELÁSTICO

Fator	Descrição
θ_1	Ângulo de parede
θ_2	Ângulo de flange
ρ	Raio de curvamento de parede

A variação do ângulo de parede, do ângulo de flange e a variação do raio de curvamento de parede permite a caracterização do retorno elástico obtido nos ensaios práticos experimentais.

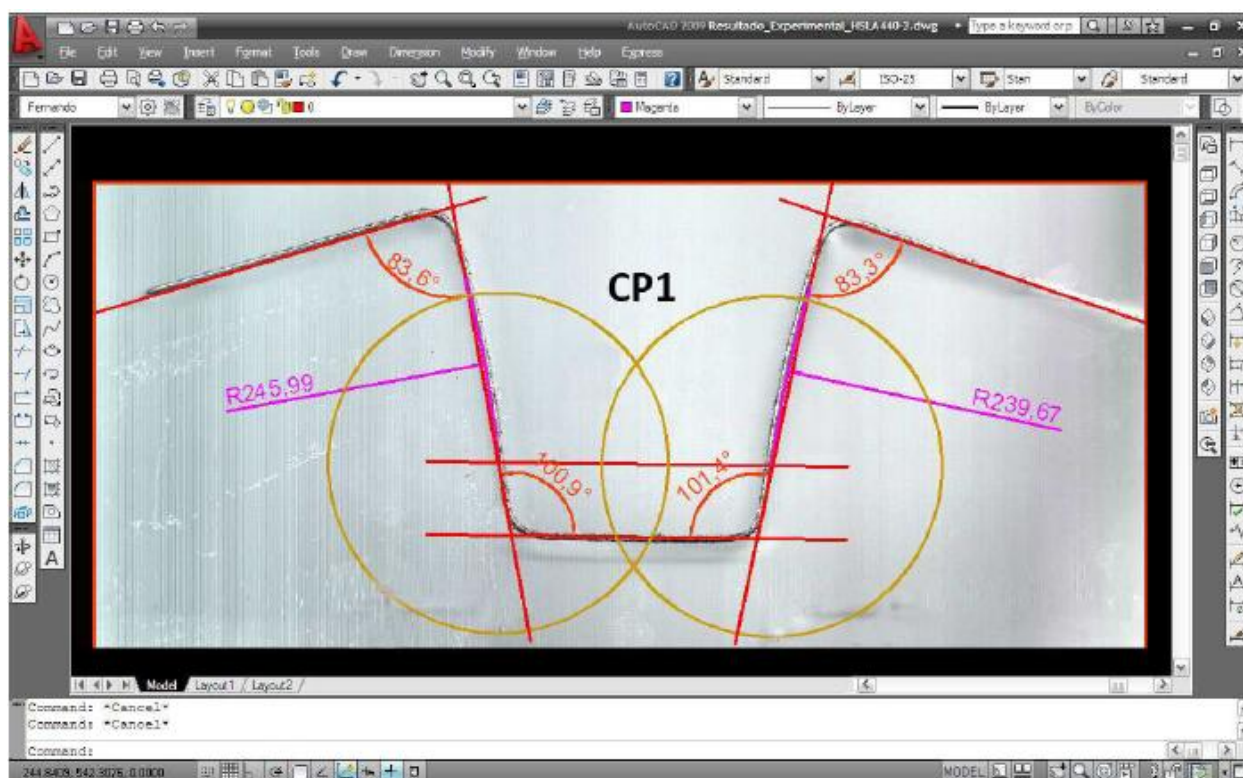
Para mensurar o retorno elástico foi utilizado o procedimento descrito por Lajarin (2102). A geometria do corpo de prova foi digitalizada em um escâner com resolução de seiscentos pontos por polegada (600dpi) juntamente com uma escala métrica, conforme o exemplo que pode ser visto na Figura 26.

FIGURA 26 – IMAGEM DIGITALIZADA DO CORPO DE PROVA



Em seguida as imagens foram analisadas com o auxílio do programa AutoCAD® e foram medidas as variações do ângulo de parede (θ_1), ângulo de flange (θ_2) e o raio de curvamento de parede (ρ), conforme ilustrado na Figura 27.

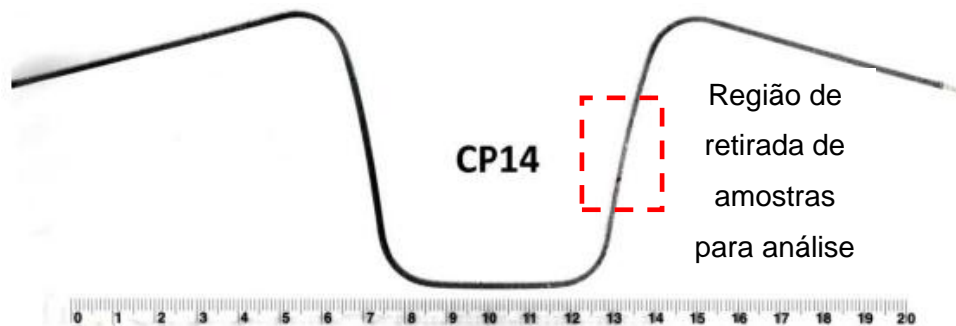
FIGURA 27 - MEDIÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO COMPUTADOR



3.1.5 Análise metalográfica, microdureza e espessura

A análise metalográfica, microdureza e espessura foram realizadas em amostras retiradas da região do raio de curvamento de parede, dos corpos de prova embutidos, conforme ilustrado na Figura 28.

FIGURA 28 – REGIÃO DO RAIÃO DE CURVAMENTO DE PAREDE



Para fazer a medição da espessura das peças embutidas foi utilizado um micrômetro de ponta abaulada, ilustrado na Figura 29. A medição da espessura foi realizada antes da retirada das amostras para o ensaio metalográfico.

FIGURA 29 – MICRÔMETRO DE PONTA ABAULADA



Os materiais conforme recebidos do fabricante e as peças embutidas foram analisadas através de microscopia ótica. As técnicas utilizadas para a preparação metalográfica seguiram os procedimentos de ensaio, normatizadas pela ASTM E 3-10 (2007): corte da amostra na região a ser estudada; embutimento em baquelite; lixamento, utilizando lixas com diferentes granulações e polimento.

O ataque das amostras foi realizado por imersão em solução de Nital a 4% durante 5s, com posterior secamento por ar soprado. Para fazer a análise metalográfica foi utilizado um microscópio ótico da marca Olympus®, modelo BX51M, ilustrado na Figura 30.

FIGURA 30 – MICROSCÓPIO ÓTICO



Para fazer a medição da microdureza foi utilizado um durômetro da marca Mitutoyo®, modelo HM-200, que pode ser observado na Figura 31.

FIGURA 31 – DURÔMETRO MICRO VICKERS



3.2 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

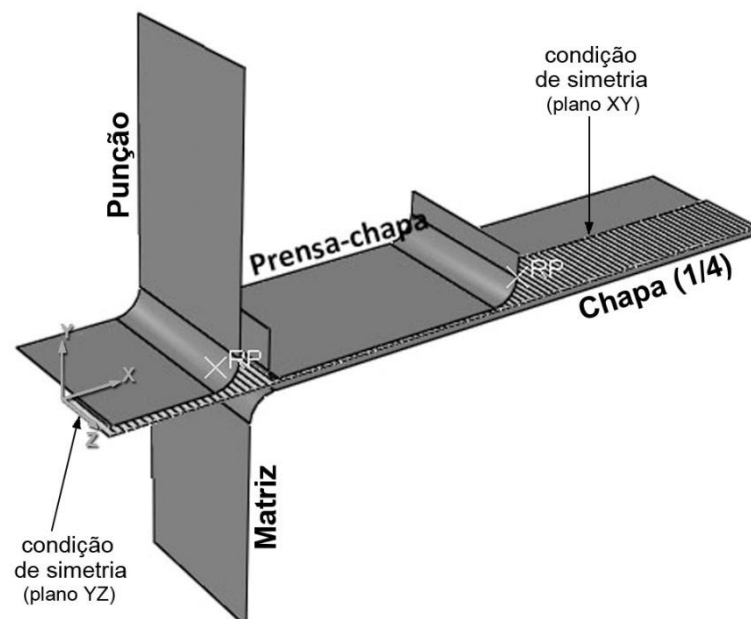
A segunda abordagem da pesquisa consiste na execução de experimentos computacionais que foram realizados com o uso do aplicativo comercial ABAQUS® versão 6.14 que permite a análise de processos pelo método de elementos finitos. Os principais passos dos experimentos computacionais são: (i) construção do modelo computacional; (ii) análise da influência e ajuste dos parâmetros computacionais na previsão do retorno elástico e (iii) medição do retorno elástico.

O objetivo dos experimentos computacionais é analisar a influência dos parâmetros computacionais na previsão do retorno elástico, considerando os resultados dos experimentos práticos.

3.2.1 Construção de um modelo computacional

Considerando a condição de simetria dos experimentos práticos, os experimentos computacionais para análise pelo método de elementos finitos podem ser simplificados com a modelagem de apenas um quarto da chapa, conforme citado por Crina (2009), realizado por Lajarin (2012) e conforme está ilustrado na Figura 32.

FIGURA 32– MODELO DA FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO COM $\frac{1}{4}$ DA CHAPA



Fonte: Lajarin (2012)

As partes que compõem a ferramenta de embutimento (matriz, punção e prensa-chapas) são considerados como corpos rígidos não deformáveis. A chapa metálica é o único corpo deformável. Devido ao problema ser simétrico, apenas um quarto da chapa é modelado. As condições de contorno de simetria são estabelecidas nos planos XY e YZ, e condições de contorno restritivas de deslocamento e rotação são estabelecidas em todos os nós da chapa.

A chapa metálica é definida com elementos quadriláteros do tipo casca (*Shell*) com quatro nós e integração reduzida (S4R). Xu *et al.* (2004), Crina (2009) e Lajarin (2012) afirmam que esse tipo de elemento é amplamente utilizado em simulações de retorno elástico e que, apesar dos modelos com definição de chapa com elementos sólidos bidimensionais ou tridimensionais serem apontados na literatura com mais precisos, consomem elevado tempo de processamento computacional. O método de contato considerado é o método da penalidade.

Para representação dos materiais utilizados nos experimentos práticos foram utilizadas as propriedades mecânicas mensuradas por Tigrinho (2011), Chemin Filho (2011), Lajarin (2012) e Silva (2013) que conduziram ensaio mecânicos nestes materiais. Na Tabela 5 e na Tabela 6 estão descritas algumas propriedades mecânicas para os aços HSLA350/440 e DP350/600.

TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS HSLA350/440 E DP350/600

Material	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Along. Unif. (%)	Along. Total (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
HSLA350/440	1.50	356	449	14.8	20.8	206
DP350/600	1.57	395	620	14.9	20.0	206

Fonte: Lajarin (2012)

TABELA 6 – COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Material	n_0	n_{45}	n_{90}	$n_{\text{médio}}$	K_0	K_{45}	K_{90}	$K_{\text{médio}}$
HSLA350/440	0,147	0,133	0,135	0.138	698	656	679	678
DP350/600	0,150	0,145	0,153	0.149	957	965	978	967

Resultados obtidos a $0.04 < \varepsilon < 0.12$

Fonte: Lajarin (2012)

De acordo com Crina (2009) e Lajarin (2012), uma função adequada para descrever o comportamento elasto-plástico dos materiais é a função de escoamento quadrática de Hill'48. Para simular o comportamento anisotrópico do material no aplicativo ABAQUS® é utilizado o critério de escoamento anisotrópico de Hill'48. Para o uso desta função são requeridos valores anisotrópicos em forma de relações de tensão que representam a relação entre a tensão de escoamento de referência especificada para a plasticidade do metal e o valor de tensão de escoamento medido. R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} e R_{23} são as relações anisotrópicas da tensão de escoamento nas direções de um elemento cúbico.

Segundo Nikhare *et al.* (2008) para representar a anisotropia plana, apenas os parâmetros R_{11} , R_{22} e R_{12} são importantes, enquanto que os outros valores podem ser definidos com o valor 1. As relações matemáticas usadas para converter as relações de deformação em relações de tensão (*stress ratios*) são as seguintes:

$$R_{11} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad (1)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{(r_0 + r_{90})}} \quad (2)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_0 + 1)r_{90}}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (3)$$

Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes de anisotropia para cada direção (r_0 , r_{45} , r_{90}) O procedimento para determinação das propriedades anisotrópicas dos materiais, tais como, anisotropia normal r , coeficiente de anisotropia planar Δr entre outras, foi executado de acordo com a norma ASTM E-517. Os parâmetros de anisotropia de HILL'48 foram calculados por Lajarin (2012).

TABELA 7 – COEFICIENTES DE ANISOTROPIA PLÁSTICA DOS MATERIAIS

Material	r0	r45	r90	Δr	\bar{r}	Parâmetros de anisotropia de HILL'48			
						R11	R22	R12	$\frac{R33}{R23}$ R13
HSLA350/440	0,777	0,876	0,903	-0,036	0,858	1,042	0,977	1,020	1
DP350/600	0,835	0,676	1,088	0,285	0,819	1,070	1,019	1,151	1

Fonte: Lajarin (2012)

Com a utilização destes parâmetros é possível caracterizar os aços HSLA350/440 e DP350/600 para análise por elementos finitos no modelo computacional na temperatura ambiente. Para as demais temperaturas os materiais são representados pelos dados obtidos da equação constitutiva de *Hensel-Spittel* cujos coeficientes ajustados estão apresentados no capítulo de resultados.

3.2.2 Realização dos experimentos computacionais

Na realização dos experimentos computacionais os parâmetros de processo, parâmetros de ferramenta e de temperatura foram mantidos fixos. Isto é, o raio de ferramenta, força de prensa-chapas e folga foram mantidos fixos para cada análise pelo método dos elementos finitos.

A Tabela 8 contém os parâmetros de controle nos experimentos computacionais, conforme valores indicados na literatura. (Li *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2006; Burchitz, 2008; Crina, 2009; Lajarin, 2012)

TABELA 8 – FATORES DE CONTROLE NOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Fator	Descrição	Nível 1	Nível 2
1	Velocidade de punção (<i>time period</i>)	0,1	1
2	Coeficiente de atrito	0,025	0,144
3	Pontos de integração na espessura (NIP)	5	25
4	Quantidade de elementos de contato no raio	5	18

Fonte: Lajarin (2012)

O critério escolhido para definir os parâmetros de controle nos experimentos computacionais consistiu em selecionar as condições de processo e de ferramenta que apresentam o maior retorno elástico nos experimentos práticos descritos na literatura.

Conforme Montgomery (2005), um experimento fatorial completo com quatro fatores de controle com dois níveis leva ao arranjo de 16 rodadas experimentais. Para os experimentos computacionais necessários para este trabalho, cada fator em cada nível deve gerar um ensaio computacional para efetuar a previsão do retorno elástico no ambiente computacional.

A Tabela 9 contém todos os arranjos possíveis para os experimentos computacionais.

TABELA 9 – RODADAS EXPERIMENTAIS PARA AJUSTE DO MODELO COMPUTACIONAL

Rodada	Velocidade de punção	Coefficiente de atrito	Pontos de integração	Quantidade de elementos
1	0,1	0,025	5	5
2	1	0,025	5	5
3	0,1	0,144	5	5
4	1	0,144	5	5
5	0,1	0,025	25	5
6	1	0,025	25	5
7	0,1	0,144	25	5
8	1	0,144	25	5
9	0,1	0,025	5	18
10	1	0,025	5	18
11	0,1	0,144	5	18
12	1	0,144	5	18
13	0,1	0,025	25	18
14	1	0,025	25	18
15	0,1	0,144	25	18
16	1	0,144	25	18

Neste caso, o objetivo dos experimentos computacionais é avaliar a influência de cada parâmetro computacional na previsão do retorno elástico comparado com os resultados obtidos nos experimentos práticos. Para isto, as variáveis resposta são as mesmas dos experimentos práticos, são elas: ângulo de parede, ângulo do flange e raio de curvamento de parede. (Dongjuan *et al.*, 2007)

3.2.3 Obtenção do retorno elástico previsto computacionalmente

Cada simulação compreende duas etapas principais: carregamento (conformação real do componente) e descarregamento (afastamento do punção e retorno elástico). Segundo Lajarin (2012) existem diversos métodos de simular conformação seguida de retorno elástico. A combinação que apresentou os melhores resultados foi a usada por Li *et al.* (2010), Chen e Koç (2007) com o método explícito dinâmico na conformação e implícito estático no retorno elástico.

A etapa explícita, correspondente à conformação real do componente é dividida em três passos (*steps*), conforme está descrito a seguir.

No primeiro passo, o prensa-chapas se desloca até encostar na chapa, estabelecendo a relação de contato. No segundo passo, o prensa-chapas aplica gradualmente a força de prensa chapas, até atingir o valor programado.

No terceiro passo, o punção se desloca 70 mm para baixo empurrando a chapa para dentro da cavidade da matriz.

Na etapa implícita, correspondente ao retorno elástico após conformação, o punção é retirado imediatamente de dentro da matriz. A chapa conformada no modelo explícito é importada para o modelo implícito estático que simula o retorno elástico após o alívio das tensões internas da chapa conformada. O componente estampado apresenta o resultado da conformação e o retorno elástico é computacionalmente calculado.

Este modelo de simulação do retorno elástico procura reproduzir as mesmas condições aplicadas nos experimentos práticos. Os fatores de controle computacionais são variados conforme os arranjos previstos na Tabela 9 e novas simulações são realizadas, para a temperatura ambiente, até ajustar o modelo. É identificado o arranjo que mais se aproxima dos valores obtidos nos experimentos práticos.

Por fim, um experimento computacional é realizado para cada outra temperatura dos experimentos práticos e nas mesmas condições cinemáticas e geométricas. Ou seja, os parâmetros de processo e os parâmetros de simulação que produziram os retornos elásticos mais próximos dos experimentos práticos na temperatura ambiente foram utilizados como valores fixos para simulação numérica nas demais temperaturas.

3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS

Os resultados dos experimentos práticos são avaliados através da análise estatística com o objetivo de identificar quais são os parâmetros de maior influência na magnitude do retorno elástico, tentando observar padrões e transformando os resultados em conceitos.

No caso dos experimentos computacionais, é dispensada a análise estatística dos resultados porque não há variação entre duas rodadas experimentais com os mesmos parâmetros de simulação.

Após a simulação numérica o valor do retorno elástico obtido pelo método dos elementos finitos é comparado diretamente com os resultados dos experimentos práticos. Os resultados dos experimentos práticos são sobrepostos à previsão do modelo computacional em gráficos para análise comparativa. O objetivo é analisar como a escolha dos parâmetros computacionais e a interação deles pode atuar na previsão numérica do retorno elástico.

A análise comparativa oferece uma interpretação dos experimentos práticos que associada à previsão computacional do retorno elástico deverá possibilitar a compreensão da influência dos parâmetros de processo, de ferramenta e temperatura no retorno elástico após a conformação dos aços de alta resistência.

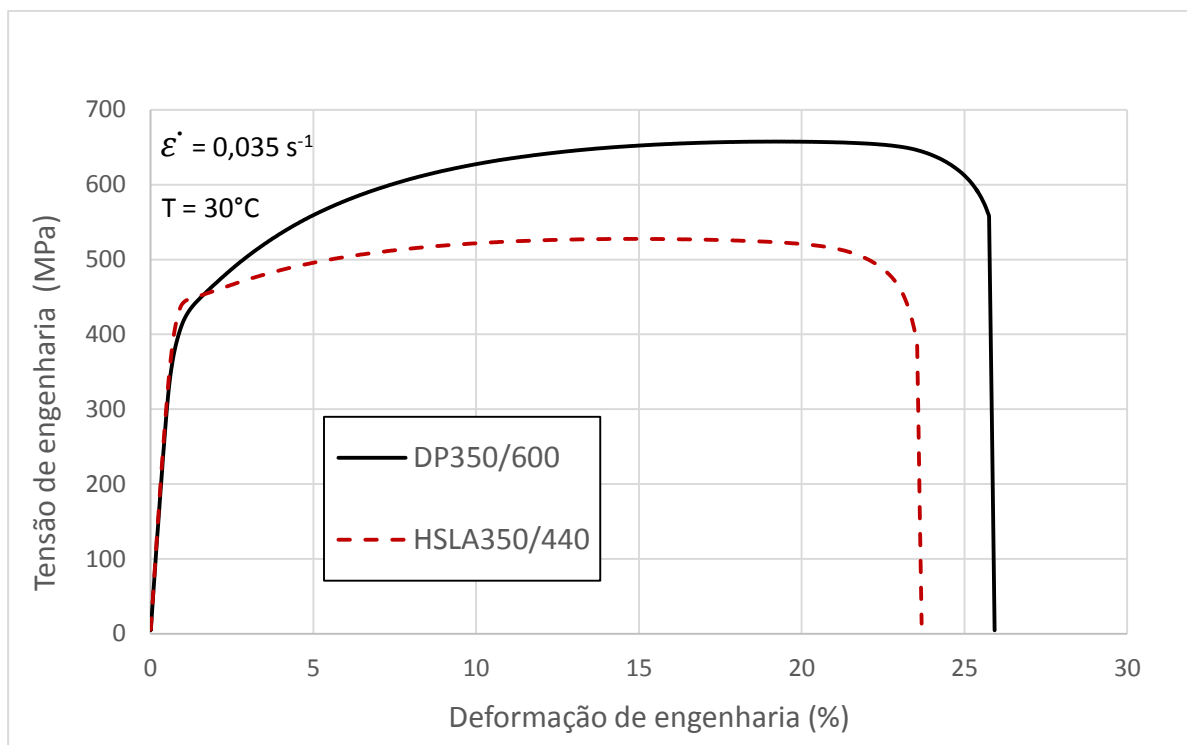
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos a seguir.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO COM CONTROLE DE TEMPERATURA

Como primeiro resultado, foram reproduzidas as curvas de tensão versus deformação de engenharia dos materiais, semelhantes às curvas descritas por World Auto Steel (2014), considerando a temperatura de ensaio de 30°C e taxa de deformação de $0,0345\text{s}^{-1}$ (velocidade de ensaio de 2,5mm/s).

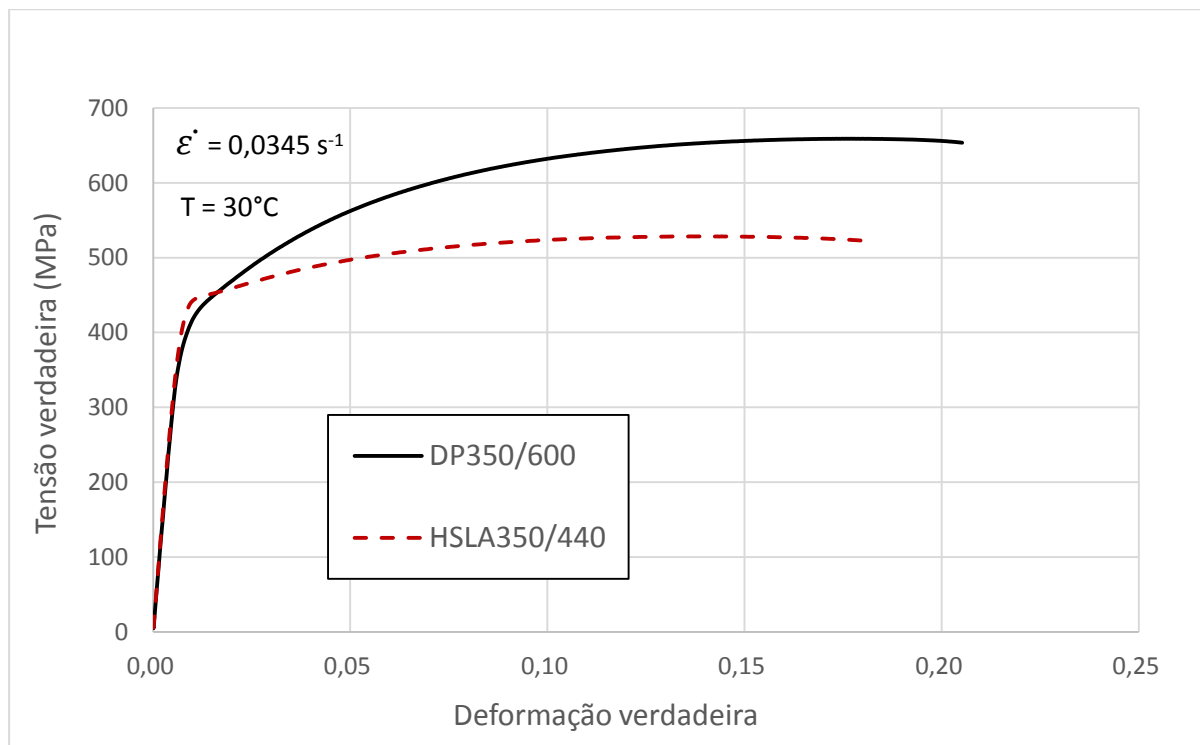
FIGURA 33 – DIAGRAMA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO HSLA350/440 X DP350/600



A análise da Figura 33 permite comparar as informações da literatura com as propriedades dos materiais conforme recebidos do fabricante e ensaiados na prática. Pode-se observar que o HSLA350/440 apresentou uma mudança mais explícita da região elástica para a região plástica e limite de tensão menor que o DP350/600. Ambos os materiais apresentaram o limite de deformação na fratura próximo de 25%.

A curva de tensão de engenharia em função da deformação de engenharia permite comparar os materiais conforme recebidos do fabricante. Para uma análise de conformabilidade é mais comum a utilização da curva de tensão versus deformação verdadeira, tal qual ilustrada na Figura 34.

FIGURA 34 – TENSÃO DEFORMAÇÃO VERDADEIRA HSLA350/440 X DP350/600

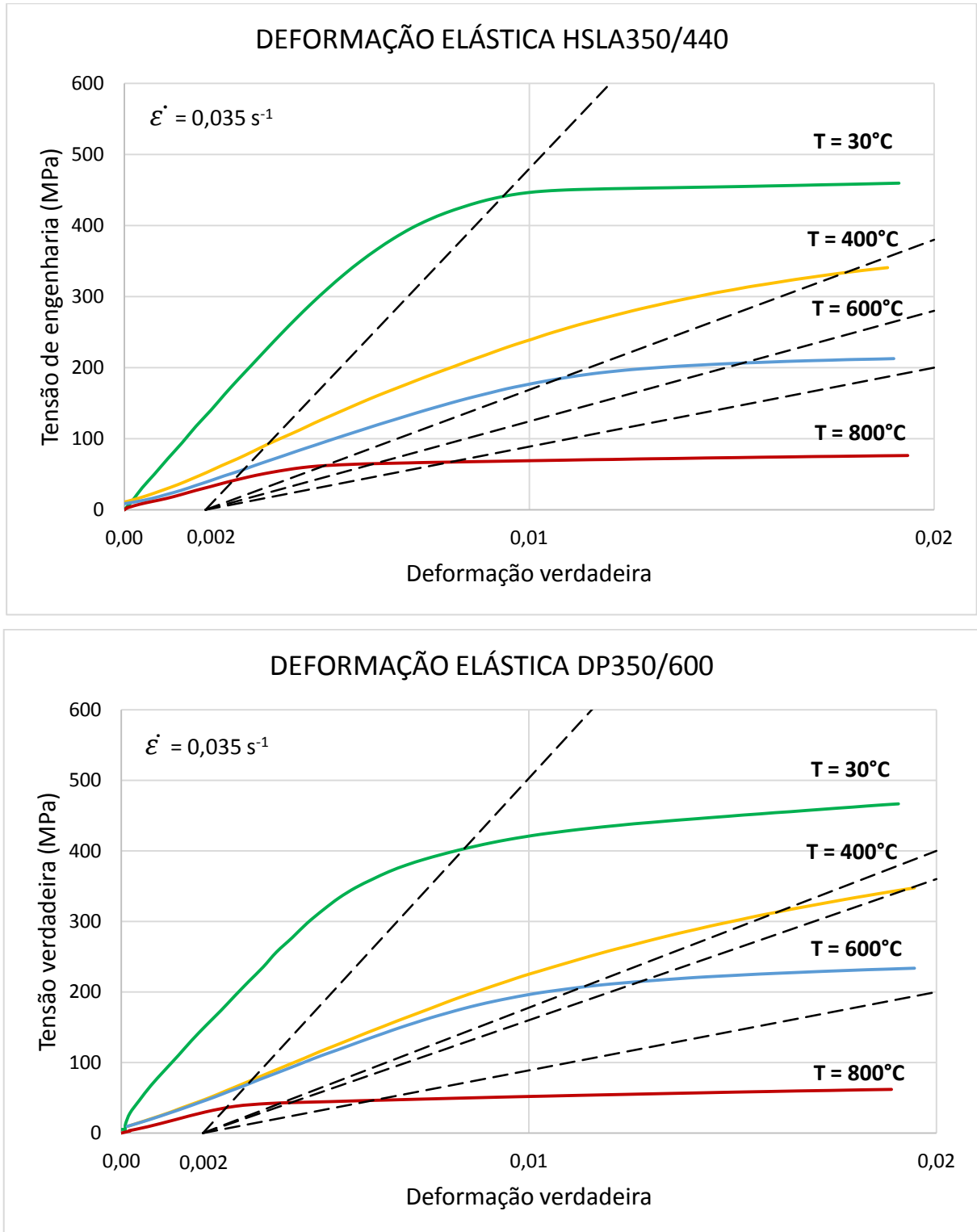


Os dados para geração do diagrama de tensão versus deformação verdadeira são obtidos a partir dos resultados dos ensaios de tração convencional. Para o cálculo da taxa de deformação deve ser considerado o tamanho inicial do corpo de prova, o tamanho final do corpo de prova e a velocidade do travessão da máquina de tração, conforme as equações descritas anteriormente, na revisão bibliográfica.

De uma forma simplificada, o diagrama de tensão versus deformação verdadeira leva em consideração as reduções de espessura e largura da amostra na região de ruptura do corpo de prova. Este tipo de informação é fundamental para alimentação do modelo matemático de encruamento a ser utilizado no programa de simulação numérica. Um modelo matemático que descreva o comportamento do material sob estado de tensão deve ser parametrizado com base nos resultados práticos para representar a deformação do material sob condições conhecidas e extrapolar para outras condições que não foram testadas na prática.

Os resultados experimentais apresentados na Figura 35 permitem a avaliação da variação da deformação elástica em função da temperatura de ensaio dos corpos de prova do aço HSLA350/440 e do aço DP350/600. Para estes resultados, os ensaios foram realizados com uma velocidade de 2,5mm/s.

FIGURA 35 – DEFORMAÇÃO ELÁSTICA HSLA350/440 X DP350/600



A tensão de escoamento representa a tensão a partir da qual a deformação plástica passa a ser significativa. Como na curva de tensão versus deformação não existe um ponto bem definido ao qual corresponda o fim da deformação elástica e o início da deformação plástica, escolheu-se para a tensão de escoamento um valor onde tenha ocorrido a deformação plástica de 0,2%.

Para a temperatura de 30°C tanto o aço HSLA350/440 como o aço DP350/600 apresentam tensão de escoamento de aproximadamente 350MPa considerando a deformação de 0,2%. Em 30°C os materiais apresentam o maior limite de escoamento e a tensão de escoamento é mais destacada no gráfico.

Para a temperatura de 400°C, em ambos os materiais, foi observado uma redução na tensão de escoamento que passou a ser de aproximadamente 250MPa. Já para a temperatura de 600°C o início do escoamento foi observado abaixo de 200MPa. Para a temperatura de 800°C é possível observar que a tensão de escoamento foi reduzida para aproximadamente 70MPa, o que comprova a possibilidade de executar deformações plásticas com menores valores de força.

Os ensaios de tração também permitiram a determinação do módulo aparente de elasticidade dos materiais nas diferentes temperaturas, através do ajuste de uma reta paralela à curva de tensão x deformação iniciando 0,2% de deformação de engenharia. Os valores podem ser observados na Tabela 10.

TABELA 10 – MÓDULO APARENTE DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DE T (°C)

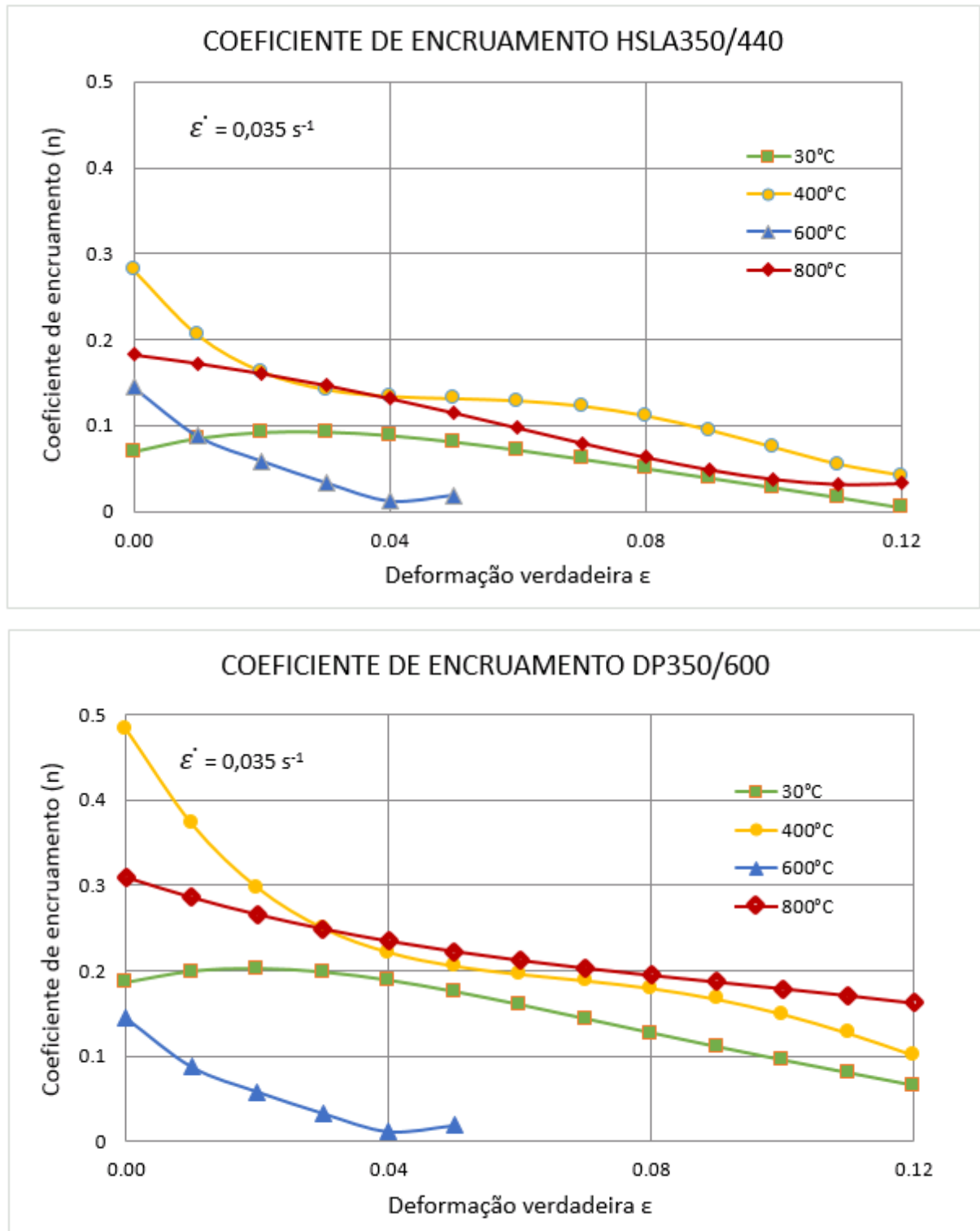
Material	30°C	400°C	600°C	800°C
HSLA350/440	66	23	20	15
DP350/600	63	23	22	14

* Valores calculados em GPa

Como o aumento da temperatura verificou-se a redução do módulo aparente de elasticidade de ambos os materiais. Há que se considerar que o módulo aparente de elasticidade também varia em função da deformação aplicada no material. Com o aumento da temperatura, tanto as tensões de escoamento quanto as tensões limite de ruptura foram reduzidas. Ou seja, o comportamento elástico do material foi restringido à uma pequena quantidade de deformação. A partir desta região ocorre a deformação plástica e o material vai começar a encruar.

A determinação dos coeficientes instantâneos de encruamento para cada temperatura de ensaio de tração a quente foi realizada de acordo com o procedimento descrito por Konieczny (2003) e os resultados seguem ilustrados na Figura 36.

FIGURA 36 – COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO HSLA350/440 X DP350/600



Aplicando os conceitos de Konieczny (2003) foi possível determinar a variação do coeficiente de encruamento em função da temperatura, com o ajuste de uma função polinomial de quarta ordem para cada material e cada temperatura.

Através da análise gráfica foi possível comprovar que a temperatura tem grande influência no coeficiente de encruamento. Com o aumento da temperatura, o coeficiente de encruamento é aumentado, sobretudo no início da deformação plástica.

Também foi observado que, para os dois materiais ensaiados, os valores de n apresentaram tendência à estabilidade no decorrer da deformação plástica.

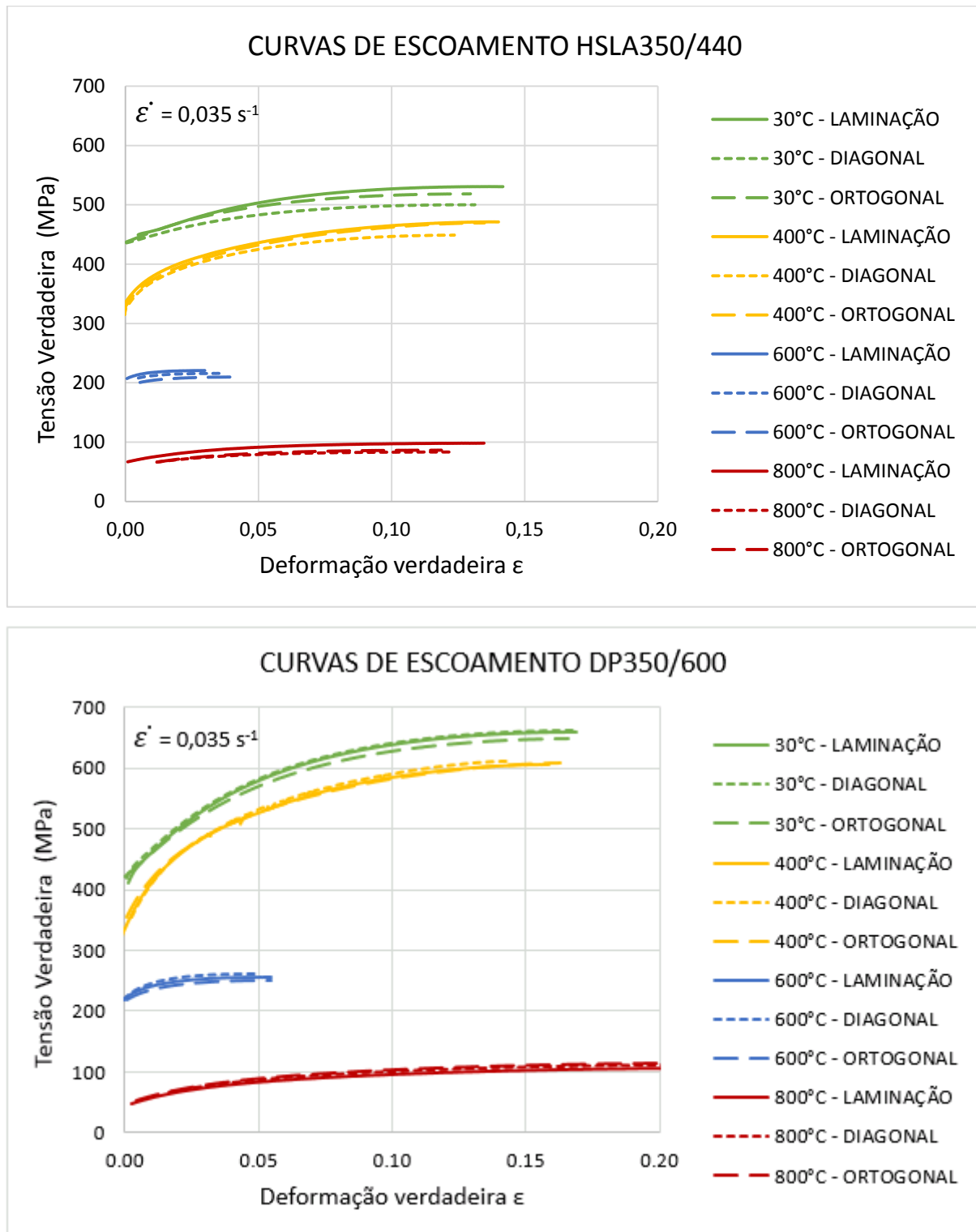
Para a temperatura de 400°C foram identificados os maiores coeficientes de encruamento iniciais, correspondendo a $n=0,3$ para o aço HSLA350/440 e $n=0,5$ para o aço DP350/600. Este resultado pode ser explicado porque, considerando que a 400°C, não foi ultrapassado a temperatura de recristalização dos materiais, e o encruamento por trabalho a frio foi aumentado. No trabalho a frio, o número de discordâncias é elevado, o que resulta no aumento da tensão de escoamento e na alteração da textura do material.

Para a temperatura de 600°C ambos os materiais apresentaram redução acentuada do coeficiente de encruamento no decorrer da deformação plástica. Para deformações de 5%, em ambos os materiais, o coeficiente de encruamento foi reduzido a um valor muito próximo de zero. Este comportamento pode explicar a ruptura precoce dos corpos de prova nos ensaios de tração realizados a 600°C. Isto porque ao reduzir rapidamente o coeficiente de encruamento, a instabilidade plástica é antecipada e o corpo de prova pode romper mesmo sob pequenas deformações.

Para a temperatura de 800°C foi possível observar que ambos os materiais apresentaram um pequeno aumento do coeficiente de encruamento em relação aos resultados dos ensaios realizados a 30°C. Isto pode ser associado aos fenômenos de recristalização e crescimento do grão, visto que na temperatura de 800°C foi ultrapassada a temperatura de recristalização do aço. Nesta faixa de temperatura, após o processo de conformação, os grãos podem resultar de forma alongada e as discordâncias podem ser eliminadas substancialmente. Como principal efeito, tem-se a redução significativa das tensões e o aumento da capacidade de deformação do material. Isto resulta, em última instância, na redução do esforço necessário para conformação e aumento do limite de deformação na fratura a 800°C.

A Figura 37 contém as curvas de escoamento obtidas a partir dos resultados dos ensaios realizados para o aço HSLA350/440 e para o aço DP350/600 com a taxa de deformação $0,0345\text{s}^{-1}$, sendo que as variáveis de controle foram a temperatura e a direção de recorte do corpo de prova.

FIGURA 37 – CURVAS DE ESCOAMENTO HSLA350/440 X DP350/600



Através da análise das curvas de escoamento, pode-se comprovar que na temperatura ambiente (considerado o valor de 30°C e velocidade de 2,5mm/s) o aço HSLA350/440 apresenta tensão limite de resistência de aproximadamente 500MPa com deformação verdadeira na fratura entre 0,10 e 0,15. Para o aço DP350/600 nestas mesmas condições o ensaio de tração resultou em tensão limite de resistência de 650MPa e deformação verdadeira na fratura entre 0,15 e 0,20.

Os dados obtidos experimentalmente ultrapassam brevemente os limites de resistência pré-estabelecidos pelo fabricante. Esta diferença pode ser associada à velocidade de ensaio utilizada neste trabalho para 30°C ($v=2,5\text{mm/s}$).

Para a temperatura de 400°C, em ambos os materiais, foi observado uma pequena redução no limite de resistência, porém foi mantida praticamente a mesma deformação na fratura.

Já para a temperatura de 600°C foi observado redução bastante significativa tanto na tensão limite de resistência quanto na deformação na fratura, sendo que ambos os materiais apresentaram valores abaixo de 300MPa e deformação na fratura abaixo de 0,05. Para a temperatura de 600°C a conformabilidade do material foi seriamente comprometida, redução que pode ser associada ao fenômeno de fragilidade ao azul, haja visto que o processo realiza embutimento sem estiramento.

Para os materiais, no ensaio de tração realizado a 800°C, o limite de resistência foi reduzido drasticamente para aproximadamente 100MPa, o que permite executar deformações plásticas com menores valores de força.

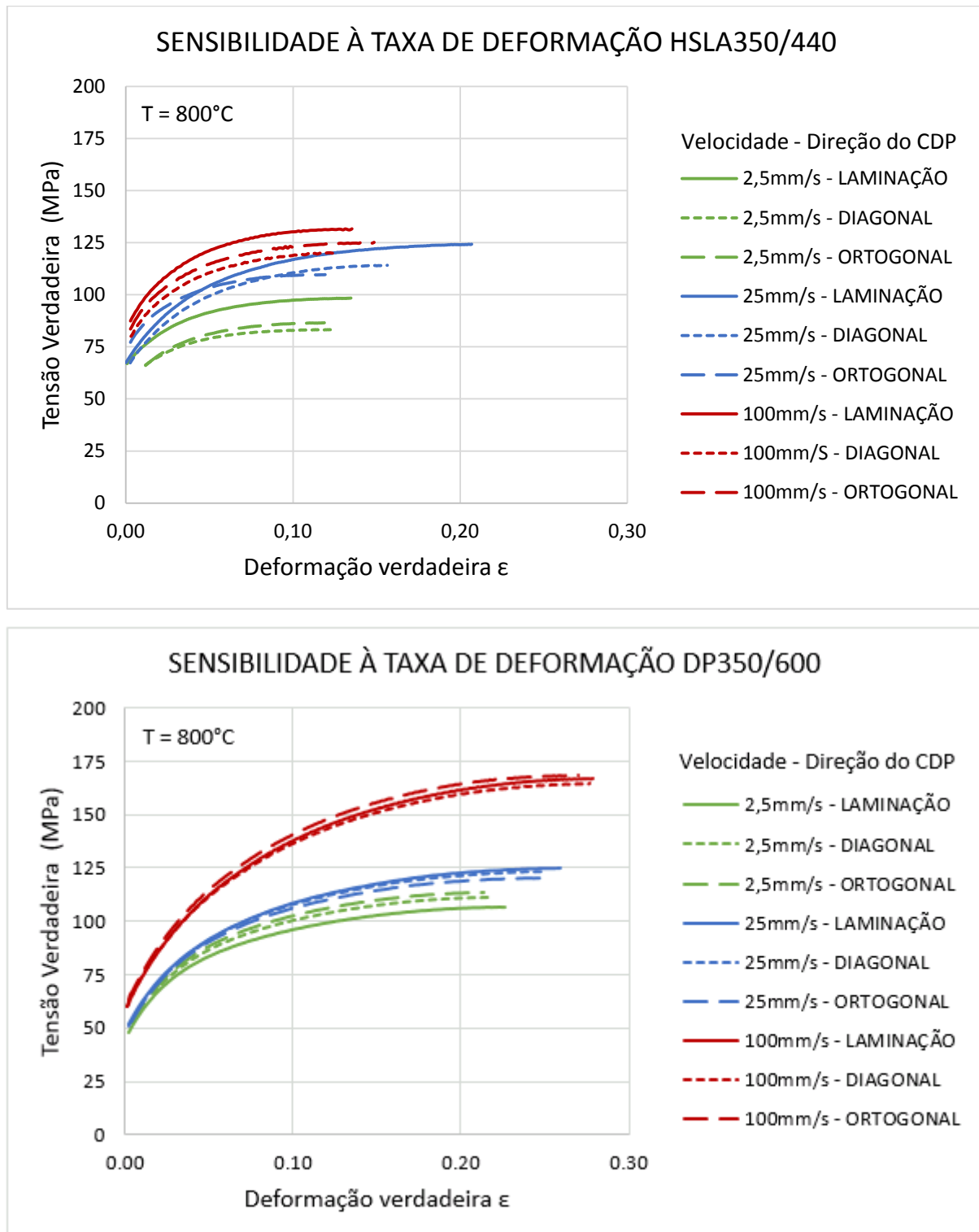
O aço HSLA350/440 apresenta pequena redução na deformação na fratura quando comparados os resultados do ensaio de tração de 800°C com 30°C.

Para o aço DP350/600 a deformação na fratura aumentou significativamente quando comparados os resultados do ensaio de tração de 800°C com 30°C.

A comparação das curvas de escoamento considerando as diferentes direções de recorte dos corpos de prova sugere que os materiais ensaiados apresentam comportamento aproximadamente isotrópico. O comportamento isotrópico é fortalecido com o aumento da temperatura, visto que as curvas de escoamento sobrepõem umas às outras, com menores afastamentos na medida em que aumenta a temperatura do ensaio de tração. Por exemplo, pode-se observar que o aço DP350/600 ensaiado a 800°C resulta em curvas muito semelhantes para os corpos de prova recortados na direção de laminação, diagonal e ortogonal.

Foi analisada a influência da taxa de deformação na região de deformação plástica nos aços estudados. A Figura 38 contém as curvas de tensão versus deformação apenas na região plástica para as velocidades de ensaio de 2,5mm/s, 25mm/s e 100mm/s, considerando a direção do corpo de prova.

FIGURA 38 – SENSIBILIDADE À TAXA DE DEFORMAÇÃO HSLA350/440 X DP350/600

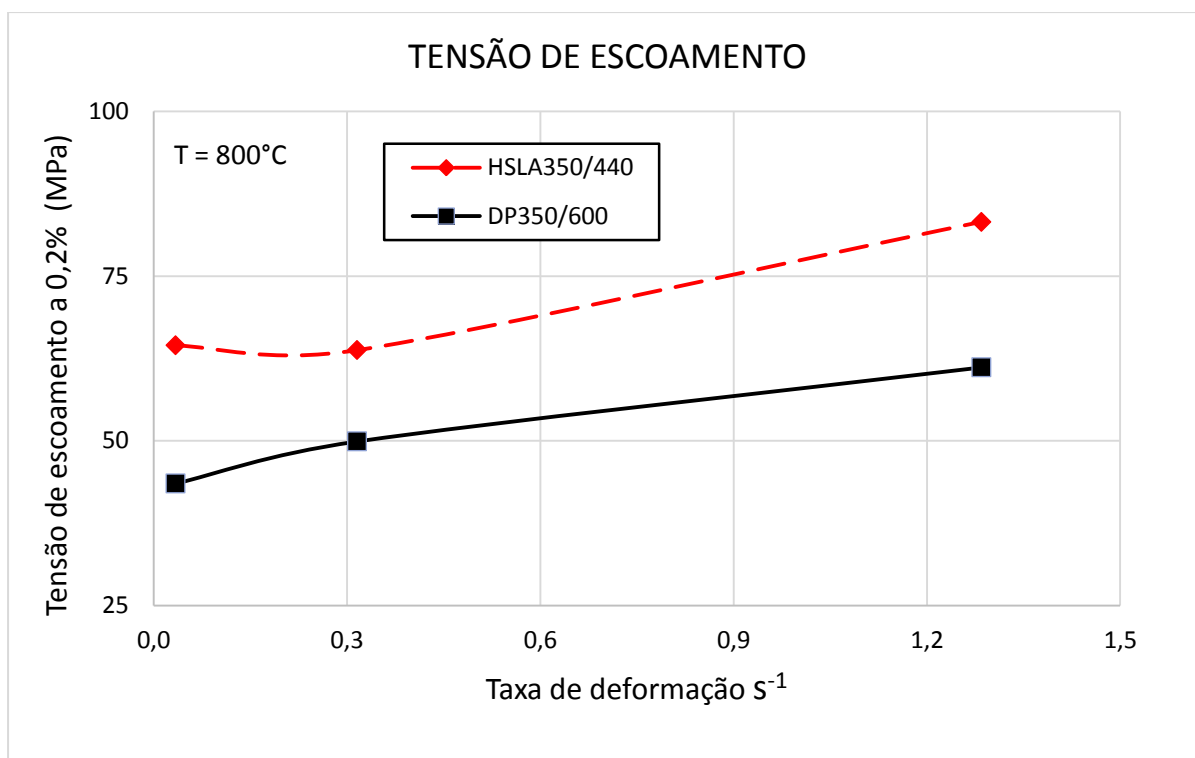


Para realização dos ensaios de sensibilidade à taxa de deformação, cada corpo de prova foi aquecido individualmente até 950°C e mantido nesta temperatura por 10min para homogeneização. Em seguida foi resfriado o corpo de prova até a temperatura de 800°C para realização do ensaio. Em seguida, os corpos de prova foram rompidos com velocidades de 2,5mm/s, 25mm/s e 100mm/s.

Nesta parte do estudo foi possível observar que tanto o aço DP350/600 quanto o aço HSLA350/440 apresentaram aumento na tensão limite de resistência com o aumento da taxa de deformação.

De forma complementar foi analisada a variação da tensão de escoamento em função da taxa de deformação pode ser observada na Figura 39.

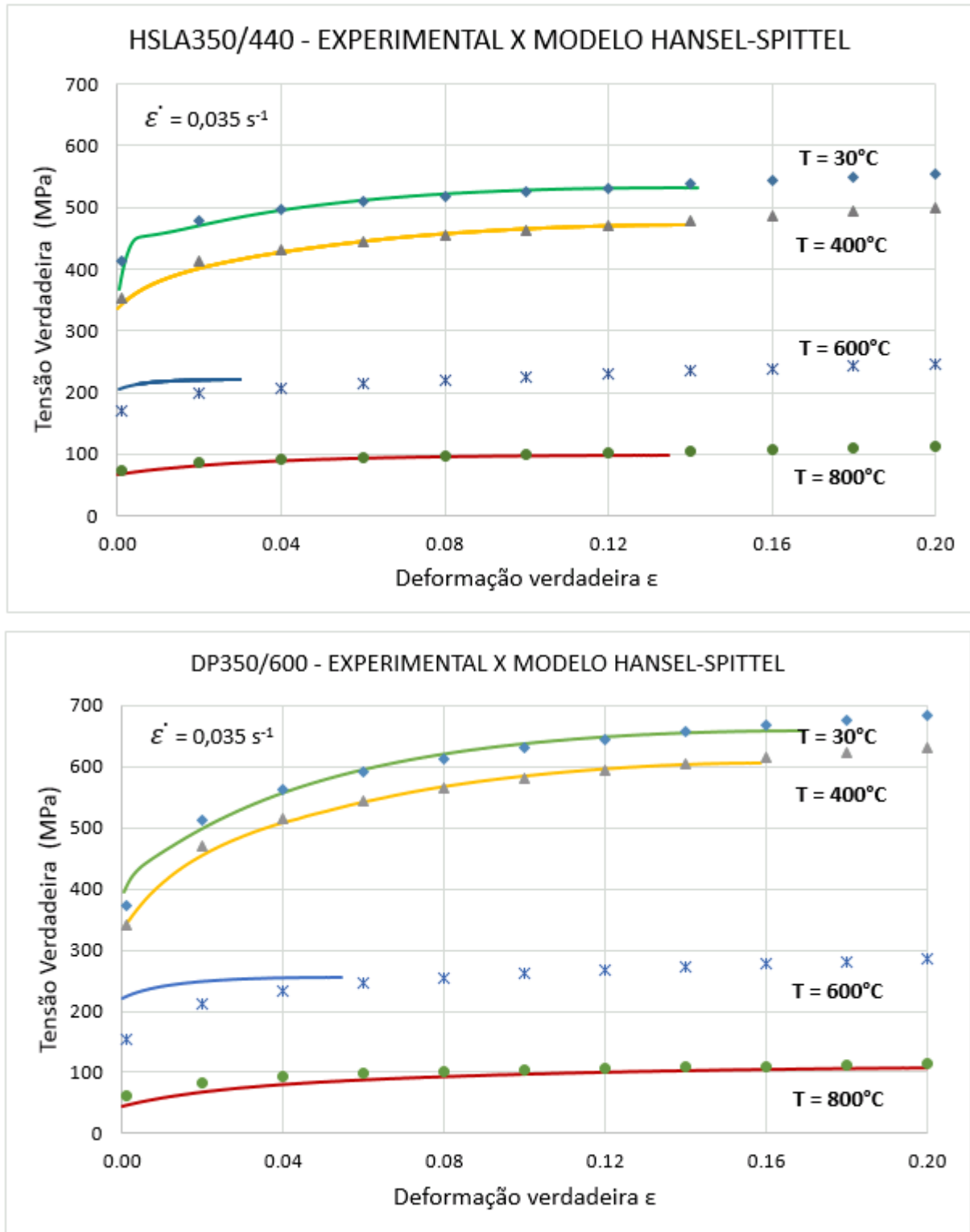
FIGURA 39 – TENSÃO DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO



Foi possível observar que os materiais ensaiados a 800°C apresentaram aumento na tensão de escoamento associado ao aumento na taxa de deformação. O cálculo dos valores de tensão de escoamento e o ajuste da curva de tendência foram feitos com base no modelo proposto por Yan (2003) e a equação de Ludwig descritos na revisão bibliográfica. A análise dos resultados experimentais confirmou que a variação na taxa de deformação na faixa de $10^{-3} s^{-1}$ a $10^1 s^{-1}$ resulta em um considerável aumento na tensão de escoamento.

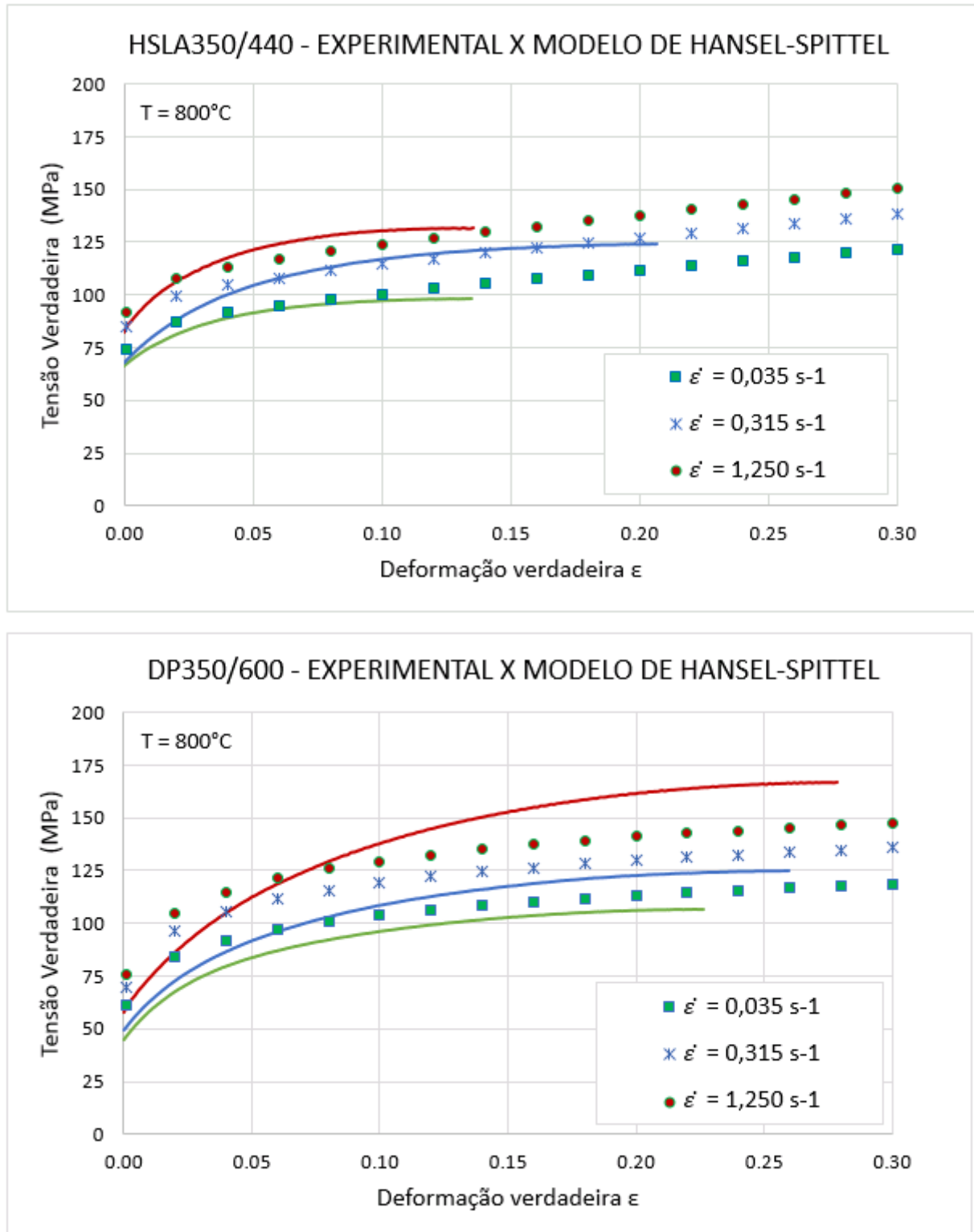
Com base nos resultados experimentais dos ensaios de tração com controle de temperatura, também foram ajustados ao modelo de *Hensel-Spittel*, e o comparativo pode ser observado na Figura 40.

FIGURA 40 – MODELO DE HENSEL-SPITTEL AJUSTADO PARA TEMPERATURA



Com base nos resultados experimentais dos ensaios de tração com controle da taxa de deformação, também foram ajustados ao modelo de *Hensel-Spittel*, e o comparativo pode ser observado na Figura 41.

FIGURA 41 – MODELO DE HENSEL-SPITTEL AJUSTADO PARA TAXA DE DEFORMAÇÃO



Os coeficientes do modelo de *Hensel-Spittel* ajustados aos resultados experimentais foram obtidos por regressão não linear com o auxílio do programa OriginPro® Versão 2016 – b9.3.2.303 – (*Evaluation*), considerando um nível de confiança de pelo menos 99,5%. Os coeficientes de ajuste do modelo de *Hensel-Spittel* para os materiais ensaiados podem ser observados na Tabela 11.

TABELA 11 – COEFICIENTES DO MODELO DE HENSEL-SPITTEL

Coeficiente	HSLA350/440	DP350/600
A	0,00544	0,00532
m ₁	0,00706	0,00638
m ₂	0,04944	0,13996
m ₃	-2,82239	-2,81979
m ₄	2,955E-6	1,018E-4
m ₅	8,170E-4	8,358E-5
m ₇	0,14762	-0,17128
m ₈	0,00360	0,00360
m ₉	0,65944	0,79506

Segundo a revisão bibliográfica, este é um dos modelos de deformação plástica mais completos porque leva em conta a temperatura e a taxa de deformação aplicadas nas peças durante o processo de conformação. De acordo com a análise das curvas de escoamento, foi possível ajustar a equação do modelo de *Hensel-Spittel* aos resultados obtidos nos ensaios de tração tanto para o aço HSLA350/440 quanto para o aço DP350/600.

Com o modelo de *Hensel-Spittel*, tendo por base os coeficientes ajustados para os resultados dos ensaios de tração, é possível gerar valores de tensão e deformação previstos para outras temperaturas e outras taxas de deformação que não tenham sido determinadas a partir dos resultados dos ensaios de tração. Estes valores gerados pelo modelo de *Hensel-Spittel* com os coeficientes ajustados podem ser utilizados para simulação numérica. Esta é justamente a principal função de um modelo matemático, ou seja, ajustar-se a uma base de dados experimentais e permitir a extrapolação para outros valores que não foram ensaiados experimentalmente.

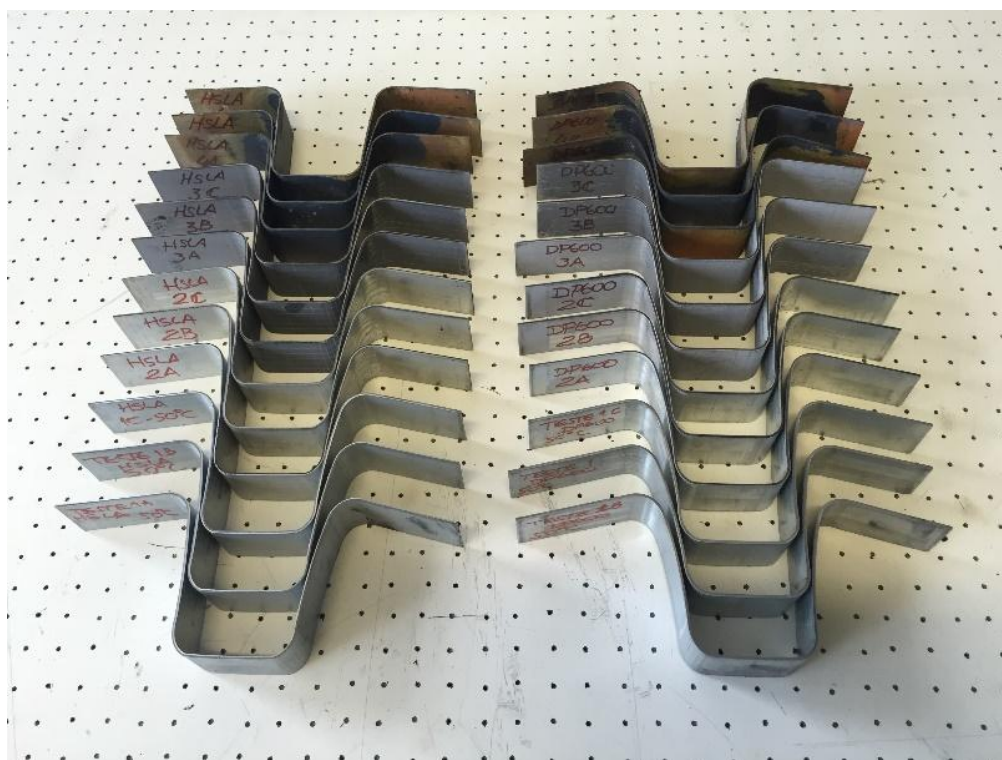
Os valores de tensão e deformação plástica obtidos a partir do modelo de *Hensel-Spittel* ajustados para as condições dos ensaios práticos de embutimento são utilizados nos experimentos computacionais descritos mais adiante neste trabalho.

4.2 EXPERIMENTOS PRÁTICOS DE EMBUTIMENTO

No capítulo de metodologia e planejamento experimental, foi prevista a realização de ensaios práticos de embutimento com controle da temperatura e variação da taxa de deformação para mensurar o retorno elástico.

Foram executadas 12 rodadas de ensaios experimentais com controle da temperatura e velocidade de punção, conforme os parâmetros descritos na Tabela 3. Para cada rodada experimental foram executadas três repetições, obtendo como resultado 36 corpos de prova embutidos, ilustrados na Figura 42.

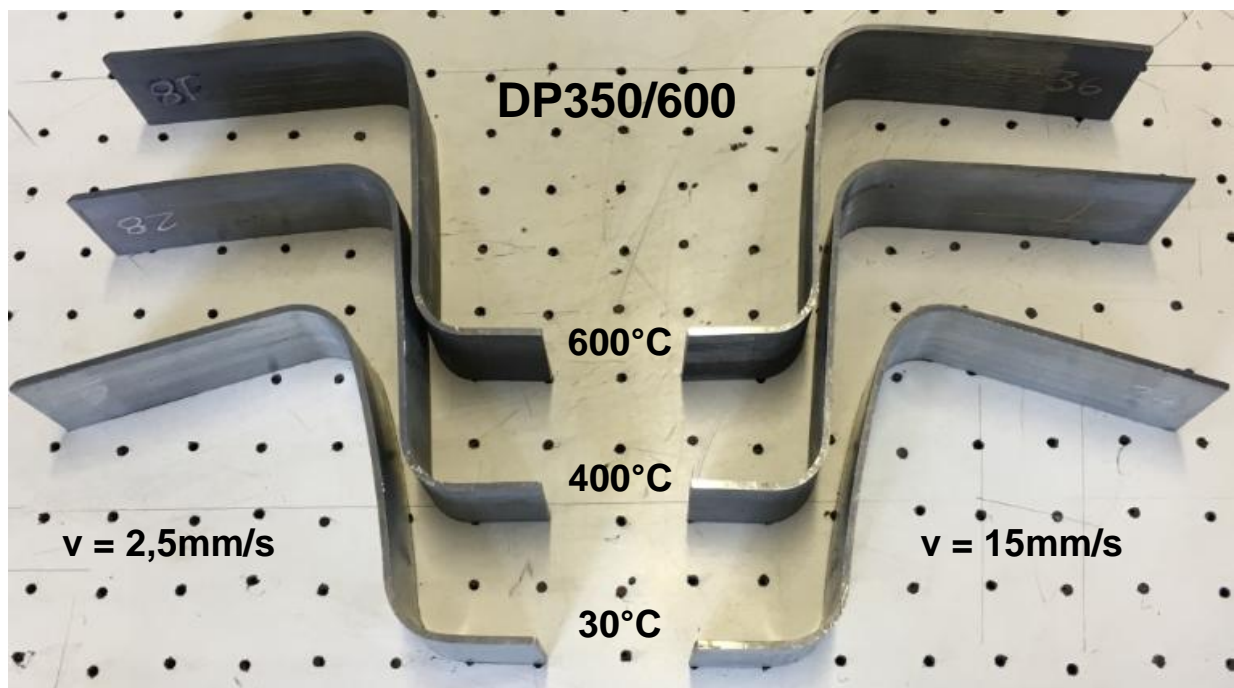
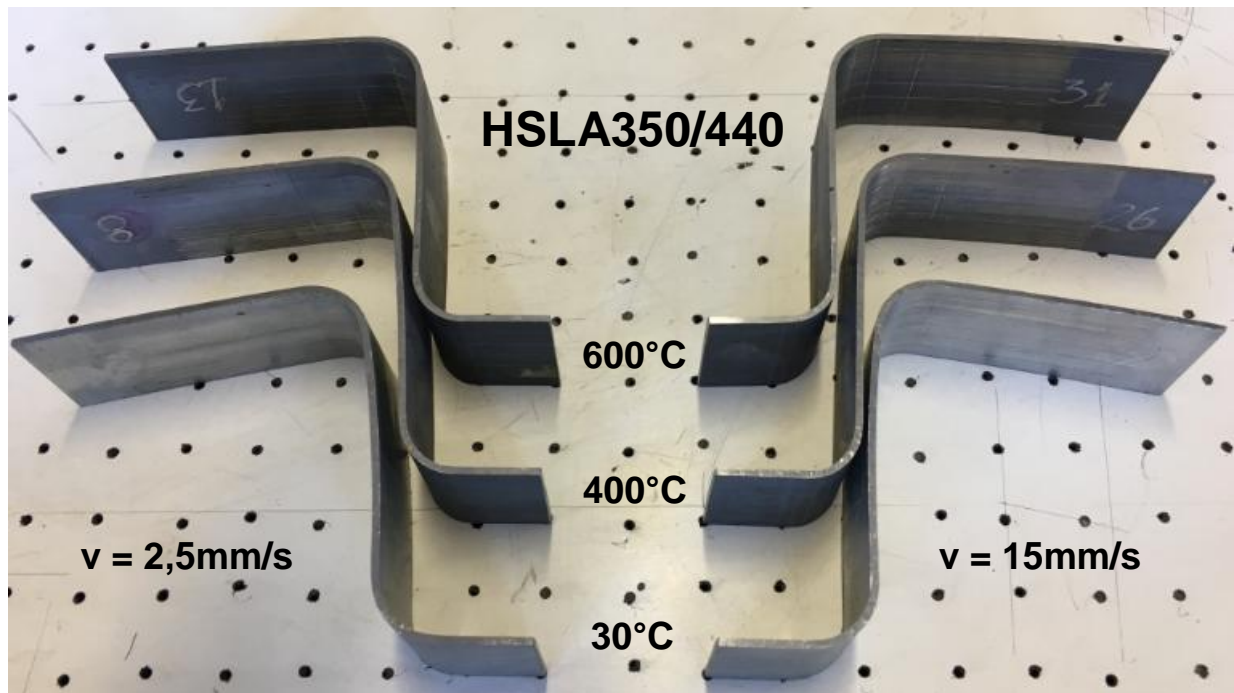
FIGURA 42 – CORPOS DE PROVA RESULTANTES DA OPERAÇÃO DE EMBUTIMENTO



Para cada rodada experimental, um conjunto de três corpos de prova foi aquecido no forno, mantido por 10 minutos para homogeneização da temperatura, envoltos em uma manta de carbono para evitar a oxidação dentro do forno. Em seguida os corpos de prova foram transferidos, um de cada vez, para a ferramenta na prensa, onde foi efetuado o processo de embutimento. Por fim, o sistema de refrigeração foi acionado para remover o calor da ferramenta e do corpo de prova através da circulação de água gelada através dos canais de refrigeração.

Os corpos de prova embutidos foram identificados um a um e classificados em função dos parâmetros de processo, temperatura e velocidade de punção. A Figura 43 contém a fotografia dos corpos de prova, na qual se pode perceber a variação do retorno elástico para as diferentes condições ensaiadas.

FIGURA 43 – CORPOS DE PROVA E SUAS CONDIÇÕES DE EMBUTIMENTO



Através da metodologia descrita por Lajarin (2013), os corpos de prova embutidos foram digitalizados em imagens com o auxílio de um *scanner* com resolução de 400dpi. Em seguida, as imagens dos corpos de prova foram analisadas com o auxílio do programa AutoCad®, que possibilitou a medição do retorno elástico, conforme as definições do *benchmark problem* proposto por Makinouchi *et al.*, 1993.

A Tabela 12 contém os resultados dos valores mensurados para as variáveis do retorno elástico nos corpos de prova embutidos em aço HSLA350/440.

TABELA 12 – RETORNO ELÁSTICO PARA PEÇAS EMBUTIDAS EM HSLA350/440

Corpo de prova	Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
1	30	2,5	96,8	400	85,9
2	30	2,5	95,6	394	85,5
3	30	2,5	99,3	341	85,6
7	400	2,5	98,9	338	86,5
8	400	2,5	97,0	615	88,0
9	400	2,5	95,4	662	88,8
13	600	2,5	94,6	3381	89,6
14	600	2,5	Corpo de prova rompeu durante o ensaio		
15	600	2,5	Corpo de prova rompeu durante o ensaio		
19	30	15	98,9	370	84,2
20	30	15	96,8	336	84,8
21	30	15	97,6	363	84,6
25	400	15	94,1	1964	89,6
26	400	15	94,1	3380	88,8
27	400	15	93,5	4011	89,8
31	600	15	94,9	2397	87,7
32	600	15	95,4	1034	87,8
33	600	15	94,3	2488	88,4

Para os ensaios de embutimento realizados com o aço HSLA350/440 na temperatura de 600°C com velocidade de punção de 2,5mm/s dois corpos de prova romperam, restando apenas uma peça embutida para medição do retorno elástico.

A Tabela 13 contém os resultados dos valores mensurados para as variáveis do retorno elástico nos corpos de prova embutidos em aço DP350/600.

TABELA 13 – RETORNO ELÁSTICO PARA PEÇAS EMBUTIDAS EM DP350/600

Corpo de prova	Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
4	30	2,5	101,7	311	85,6
5	30	2,5	102,1	336	85,4
6	30	2,5	102,2	280	86,1
10	400	2,5	95,1	1943	89,5
11	400	2,5	96,2	639	88,3
12	400	2,5	94,4	9843	90,1
16	600	2,5	97,5	454	85,9
17	600	2,5	96,0	1027	86,8
18	600	2,5	97,2	481	86,1
22	30	15	101,6	322	83,9
23	30	15	104,4	275	84,1
24	30	15	102,8	278	83,7
28	400	15	95,1	2355	88,1
29	400	15	101,0	325	85,7
30	400	15	96,0	1067	87,7
34	600	15	96,2	462	86,1
35	600	15	95,9	939	86,4
36	600	15	94,8	599	86,7

Os resultados de θ_1 e θ_2 mais próximos de 90° representam os melhores resultados, pois produziram o menor retorno elástico. No caso dos resultados de ρ os raios maiores representam o menor encurvamento de parede e consequente melhor resultado. Durante as medições, foi observado que as amostras com raio de curvamento de parede maior que 1000 mm dificultava a medição, pois representava visualmente uma reta. Dessa forma os resultados de ρ maiores que 1000 mm foram indicados como tendendo ao infinito, ou seja, uma quase-reta.

Em seguida, os valores mensurados do retorno elástico foram analisados com o auxílio do programa Minitab® Versão 16.2.4 com a aplicação do projeto fatorial de multinível (*Multilevel factorial design*) considerando a velocidade de punção em 2 níveis, e a temperatura em 3 níveis. Também foi considerada 3 repetições para cada arranjo experimental.

Através da análise de variância (ANOVA), foi possível identificar a significância dos fatores temperatura e velocidade de punção. Os valores de P menores que 0,05 indicam significância nos resultados. Conforme pode ser observado em negrito na Tabela 14, a temperatura é o fator mais influente nas três variáveis de mensuração do retorno elástico nas variáveis θ_1 , θ_2 e p .

TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO RETORNO ELÁSTICO NAS PEÇAS HSLA350/440

Análise de variância para θ_1

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	68,028	34,014	23,55	0,000
Velocidade (mm/s)	1	0,117	0,117	0,08	0,780
Erro	14	20,224	1,445		
Total	17	88,369			

Análise de variância para θ_2

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	11,855	5,928	4,57	0,030
Velocidade (mm/s)	1	0,642	0,642	0,50	0,493
Erro	14	18,142	1,296		
Total	17	30,639			

Análise de variância para p

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	16382673	8191337	7,22	0,007
Velocidade (mm/s)	1	661664	661664	0,58	0,458
Erro	14	15886825	1134773		
Total	17	32931162			

A Tabela 15 contém a análise de variância dos resultados obtidos na mensuração do retorno elástico nas peças embutidas em aço DP350/600. Novamente é possível identificar que o fator mais influente na mensuração do retorno elástico nas variáveis θ_1 e θ_2 foi a temperatura.

TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO RETORNO ELÁSTICO NAS PEÇAS DP350/600

Análise de variância para θ_1

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	96,625	48,313	38,61	0,000
Velocidade (mm/s)	1	2,347	2,347	1,88	0,192
Erro	14	17,517	1,251		
Total	17	116,489			

Análise de variância para θ_2

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	61,360	30,680	16,72	0,000
Velocidade (mm/s)	1	6,301	6,301	3,43	0,341
Erro	14	25,684	1,835		
Total	17	93,346			

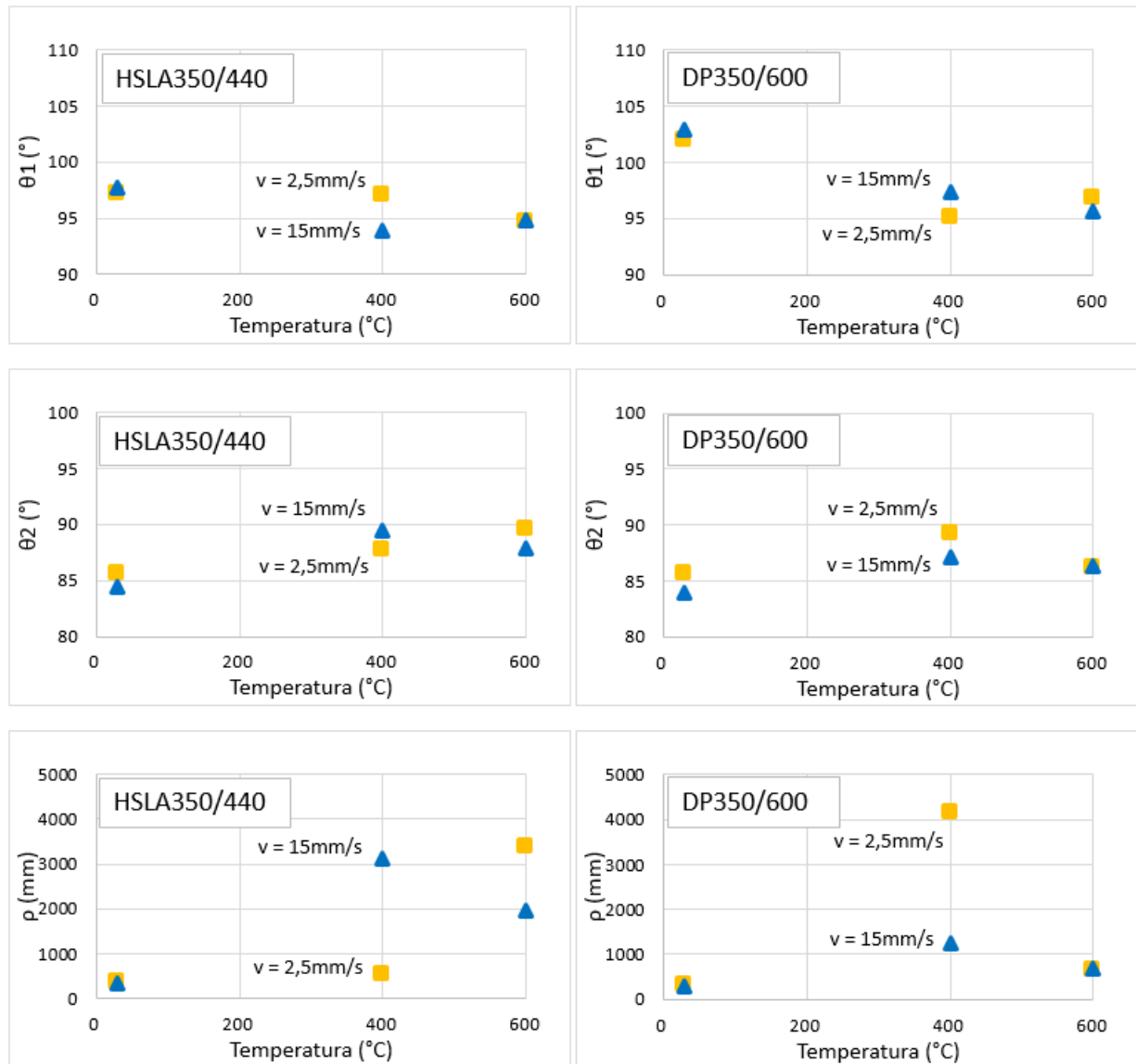
Análise de variância para p

Fonte de variação	gl	SS	MS	F	P
Temperatura (°C)	2	20017403	10008701	2,32	0,135
Velocidade (mm/s)	1	4197497	4197497	0,97	0,341
Erro	14	60409646	4314975		
Total	17	84624546			

Entretanto, considerando a variável de mensuração do retorno elástico p , a análise de variância não identificou influência da temperatura nem da velocidade de punção, para as condições experimentais das peças embutidas em aço DP350/600.

Os resultados dos experimentos práticos também permitem comparar os dois materiais ensaiados em relação ao retorno elástico. O retorno elástico resultante dos experimentos práticos de embutimento pode ser observado na Figura 44.

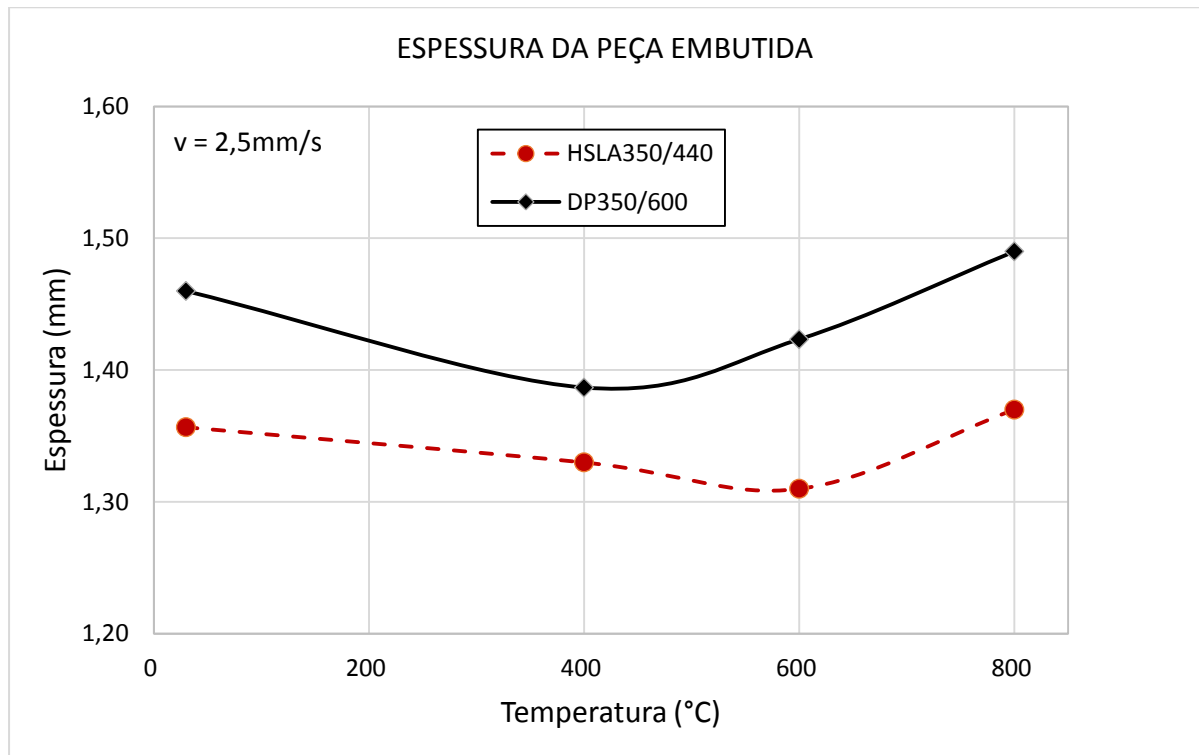
FIGURA 44 – RETORNO ELÁSTICO RESULTANTE DOS EXPERIMENTOS PRÁTICOS



Foi possível observar que o aumento da temperatura provocou a redução do retorno elástico nos corpos de prova embutidos. Para o aço HSLA350/440 na combinação da temperatura de 400°C e velocidade de 15mm/s os menores retornos elásticos foram observados. Para o aço DP350/440 os menores valores de retorno elástico foram observados na temperatura de 400°C e velocidade de 2,5mm/s.

Foi medida a redução na espessura na região de curvamento de parede. Os resultados podem ser observados na Figura 45 que relaciona a variação da espessura em função da temperatura de embutimento. Pode-se observar que o HSLA350/440 apresentou redução na espessura da peça embutida até a temperatura de 600°C. Já para o DP350/600, a maior redução na espessura da peça foi observada a 400°C.

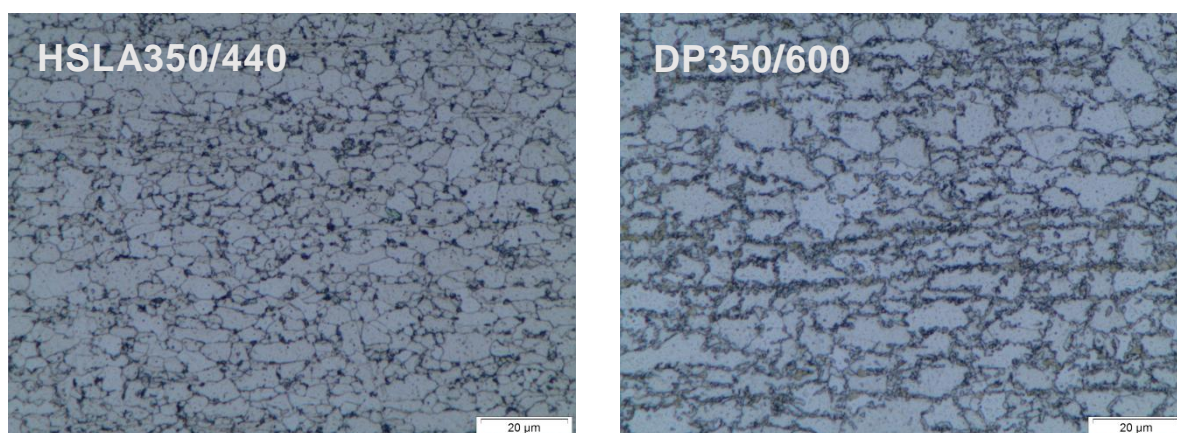
FIGURA 45 – ESPESSURA DA PEÇA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA



4.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA E MICRODUREZA

A Figura 46 contém as micrografias dos materiais conforme foram recebidos do fabricante, antes dos experimentos práticos de embutimento. Através da análise metalográfica foi possível identificar a estrutura descrita pelo fabricante em ambos os materiais.

FIGURA 46 – MATERIAIS CONFORME RECEBIDOS DO FABRICANTE



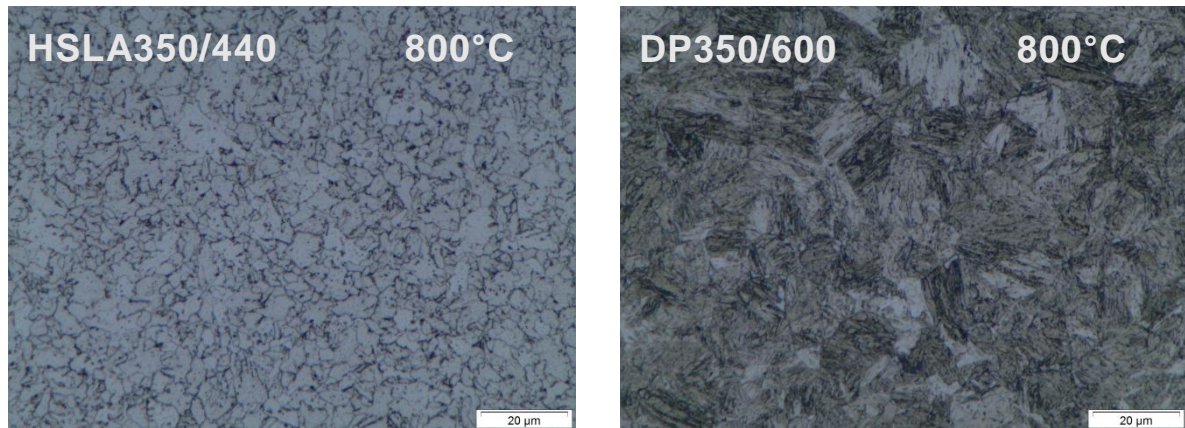
Para o aço HSLA350/440, com a amostra preparada na temperatura ambiente, foi observada uma matriz ferrítica com contornos de grãos precipitados dos elementos de liga constituintes do material.

Para o aço DP350/600, com a amostra preparada na temperatura ambiente, foi observada a existência de duas fases, sendo o material composto por ilhas de martensita rodeados por uma matriz ferrítica.

Também antes dos ensaios de embutimento, foi realizado um ensaio preliminar de aquecimento de amostras dos materiais com aquecimento até a temperatura de 800°C, mantido por 10min nesta temperatura e com o posterior resfriamento em água. O intuito deste ensaio foi de observar a mudança prevista da microestrutura devido ao resfriamento durante o processo de embutimento. O resfriamento em água promove uma elevada taxa de resfriamento semelhante àquela esperada na ferramenta durante o processo de embutimento.

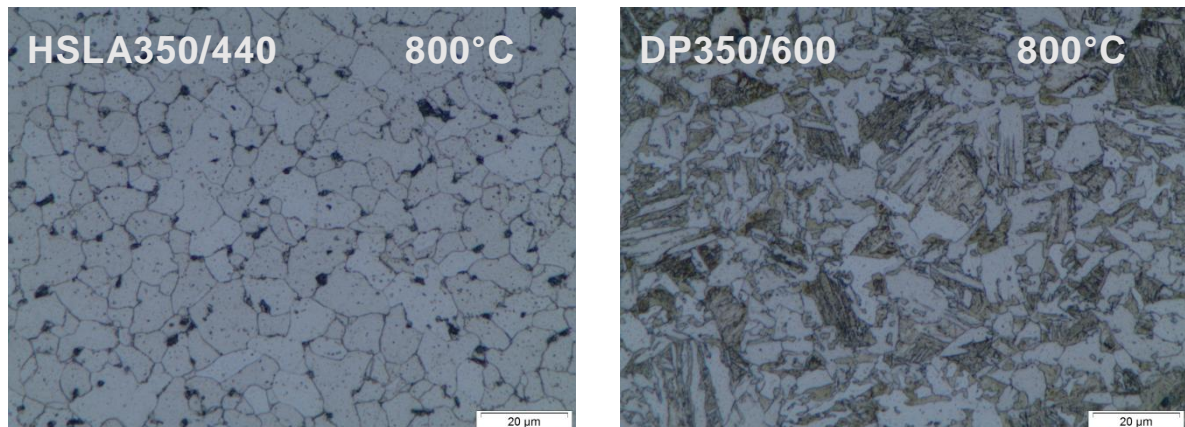
A Figura 47 contém as micrografias dos materiais aquecidos a 800°C e resfriados em água.

FIGURA 47 – MICROGRAFIAS - AQUECIDOS A 800°C E RESFRIADOS EM ÁGUA



A Figura 48 contém as micrografias dos corpos de prova embutidos a 800°C e resfriados diretamente na ferramenta.

FIGURA 48 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS A 800°C



Foi possível identificar a mudança da microestrutura de ambos os materiais após o embutimento dos corpos de prova aquecidos a 800°C. A microestrutura observada nos corpos de prova embutidos é composta de grãos maiores daquela observada nas amostras resfriados à água. Isto sugere que a taxa de resfriamento dos corpos de prova na matriz foi menor do que aquela aplicada nas amostras resfriadas em água. Entretanto, a taxa de resfriamento dos corpos de prova embutidos a 800°C diretamente na matriz foi suficiente para provocar a mudança da microestrutura dos materiais.

Quando o aço é austenitizado, os elementos de liga presentes nos carbonetos se dissolvem na austenita e dificultam os processos de difusão dentro do material, o que permite obter estrutura martensítica com taxas de resfriamento menores, ou seja, pode elevar a temperabilidade do aço.

No caso do HSLA350/440, foi possível observar que ocorreu o crescimento do grão, sendo que o contorno do grão foi refinado tendo o seu material constitutivo acumulado em suas extremidades. Isto explica a redução do limite de resistência do material durante o embutimento.

No caso do DP350/600, foi possível observar que os corpos de prova embutidos resultaram em uma microestrutura composta basicamente ferrita e martensita de maior contraste, ao contrário da microestrutura das amostras resfriadas em água.

Todos os corpos de prova aquecidos a 800°C foram rompidos durante os ensaios experimentais de embutimento, o que impossibilitou a medição do retorno elástico para esta temperatura. As duas principais alternativas indicadas na literatura para controle deste tipo de defeito são: o aquecimento da ferramenta de conformação e/ou o aumento da velocidade do punção.

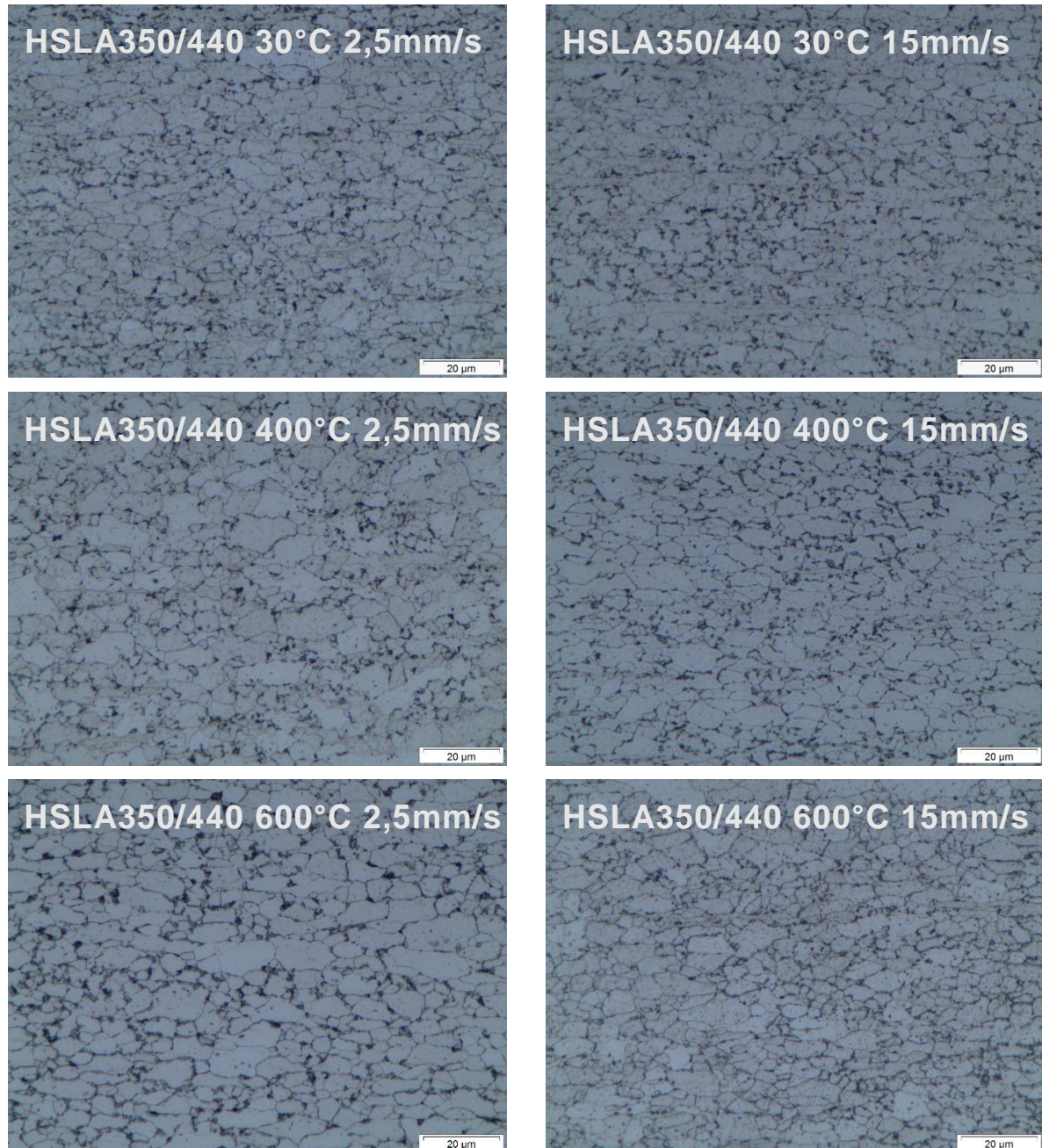
A ferramenta utilizada nos ensaios experimentais de embutimento não foi aquecida. Neste caso, a taxa de resfriamento é alterada no perfil da peça. Se a taxa de resfriamento é mais intensa na região de contato do corpo de prova com a ferramenta de conformação, isto pode resultar em tensões não uniformes e, como principal consequência, o rompimento do corpo de prova durante o embutimento.

Considerando a prensa utilizada na realização dos ensaios práticos de embutimento, a velocidade máxima de deslocamento de punção foi de 15mm/s. Neste caso, o rompimento dos corpos de prova nos ensaios de embutimento também pode ser associado à baixa velocidade do processo. A formação de microestruturas com base martensítica grosseira pode ocorrer de maneira não uniforme devido ao tempo de processo. O processo tem de ser mais rápido para manter o material austenitizado antes do resfriamento do corpo de prova na matriz.

Os corpos de prova resultantes dos experimentos práticos de embutimento efetuados nas temperaturas intermediárias também foram submetidos à análise metalográfica. Para tal, foram retiradas amostras na região do raio de curvamento de parede dos corpos de prova embutidos.

A Figura 49 contém as micrografias dos corpos de prova embutidos em HSLA350/440, com a indicação da temperatura e da velocidade de punção no ensaio.

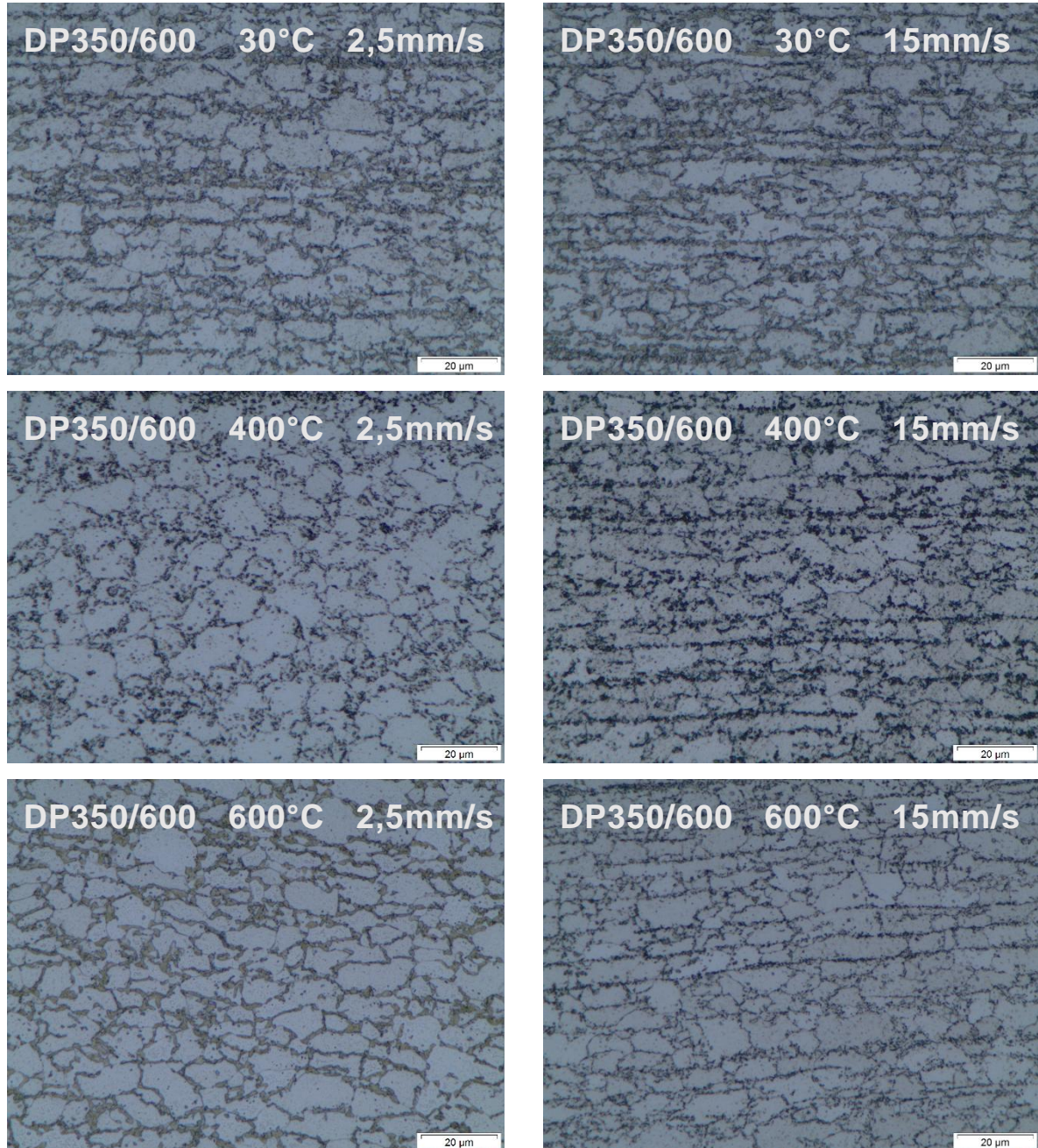
FIGURA 49 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS EM HSLA350/440



Foi possível observar que para as temperaturas de 30°C e 400°C as microestruturas dos corpos de prova permaneceram muito semelhantes à microestrutura observada no material conforme foi recebido. Entretanto, para a temperatura de 600°C o contorno do grão praticamente coalesceu e os elementos de liga foram fundidos formando ilhas na matriz ferrítica.

A Figura 50 contém as micrografias das peças embutidas em DP350/600, com a indicação da temperatura e da velocidade de punção no ensaio

FIGURA 50 – MICROGRAFIAS DAS PEÇAS EMBUTIDAS EM DP350/600



Foi possível observar que para as temperaturas de 30°C e 400°C as estruturas dos corpos de prova permaneceu muito semelhante à estrutura do material conforme foi recebido. Entretanto, para a temperatura de 600°C as ilhas de martensita foram mais concentradas e alinhadas na matriz ferrítica, que pode ser associado à redução do retorno elástico.

A dureza na escala Vickers foi medida com o auxílio de um durômetro Mitutoyo® Modelo HM-200. A carga aplicada foi de 300gf durante 10s. Os materiais foram medidos conforme recebidos e temperados em água após o aquecimento na temperatura de 800°C. Os resultados das durezas preliminares podem ser observados na Tabela 16.

TABELA 16 – DUREZA DOS MATERIAIS EM ENSAIOS PRELIMINARES

Descrição do material	HSLA350/440	DP350/600
Material conforme recebido	176HV	207HV
Aquecido a 800°C e resfriado em água	206HV	423HV
Aquecido a 800°C e resfriado na ferramenta	148HV	313HV

A dureza dos componentes embutidos também foi determinada, após os experimentos práticos de embutimento, para cada velocidade de ensaio. Foram feitas três medições em cada amostra, para calcular a dureza média, com os resultados apresentados na Figura 51 e na Figura 52.

FIGURA 51 – DUREZA DAS PEÇAS EMBUTIDAS COM V=2,5MM/S

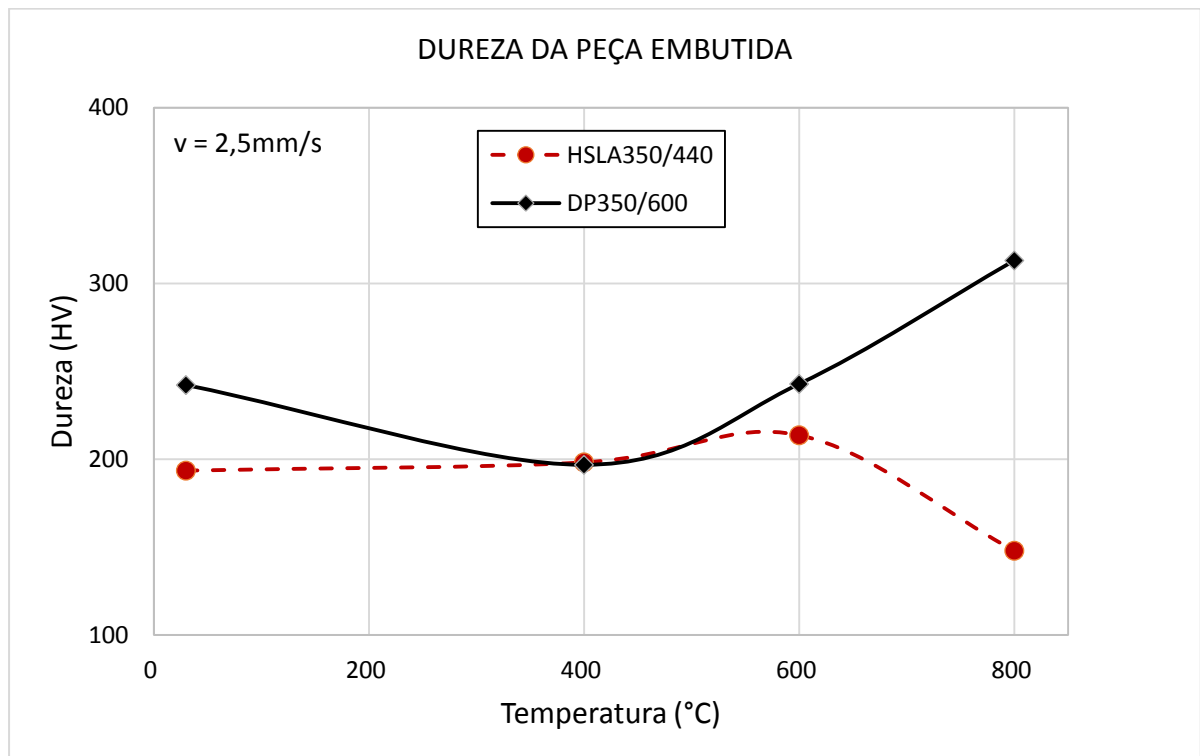
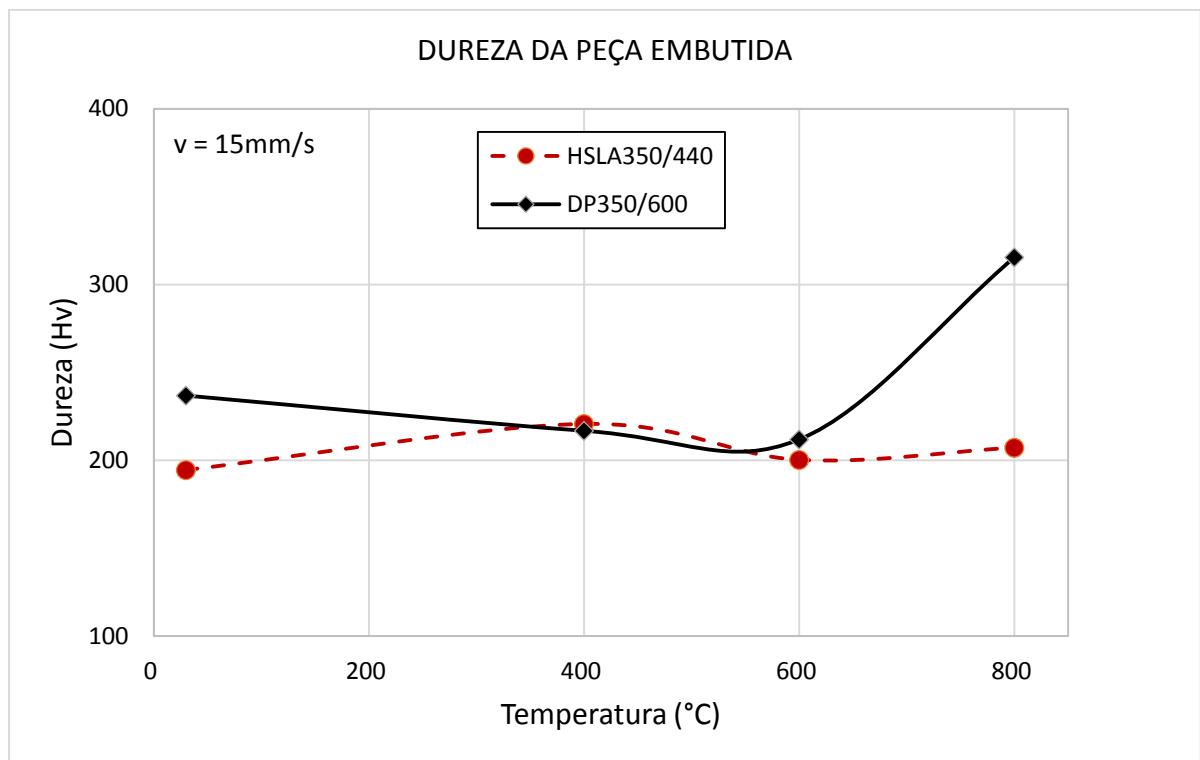


FIGURA 52 – DUREZA DAS PEÇAS EMBUTIDAS COM V=15MM/S



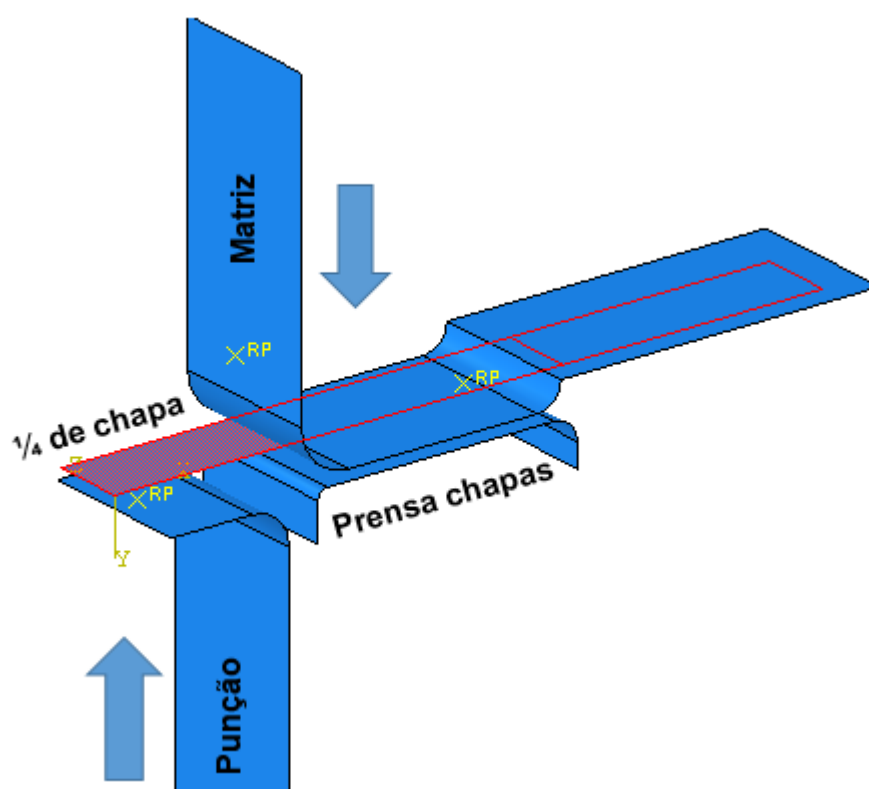
Para a temperatura de 30°C foi possível verificar um leve aumento da dureza que pode ser associado ao encruamento resultante do processo de embutimento. Para a temperatura de 400°C foi observada a redução da dureza para o DP350/600 e um leve aumento para o HSLA350/440. Para a temperatura de 600°C foi observado o aumento da dureza para ambos os materiais ensaiados. O aumento da dureza nas temperaturas de 400°C e 600°C pode ser associado ao aumento na densidade de contorno dos grãos observados nas micrografias correspondentes.

Finalmente, para 800°C, os materiais apresentaram resultados distintos, com o aumento da dureza para o DP350/600, e com a manutenção da dureza para o HSLA350/440. A manutenção da dureza nos componentes embutidos em aço HSLA350/440 na temperatura de 800°C pode ser associada ao crescimento do tamanho do grão observado nas micrografias correspondentes. Somente para o DP350/600 embutido a 800°C foi observada a formação de estrutura martensítica, o que explica o aumento da dureza.

4.4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS DE EMBUTIMENTO

Para simular o processo de embutimento foi construído um modelo computacional com o auxílio do programa ABAQUS® versão 6.14, conforme ilustrado na Figura 53. Uma matriz pressiona a chapa contra o prensa chapas e, em seguida, um punção faz o movimento para cima deslocando a chapa 70mm para dentro da matriz. Por fim, matriz e punção se afastam, liberando o componente embutido.

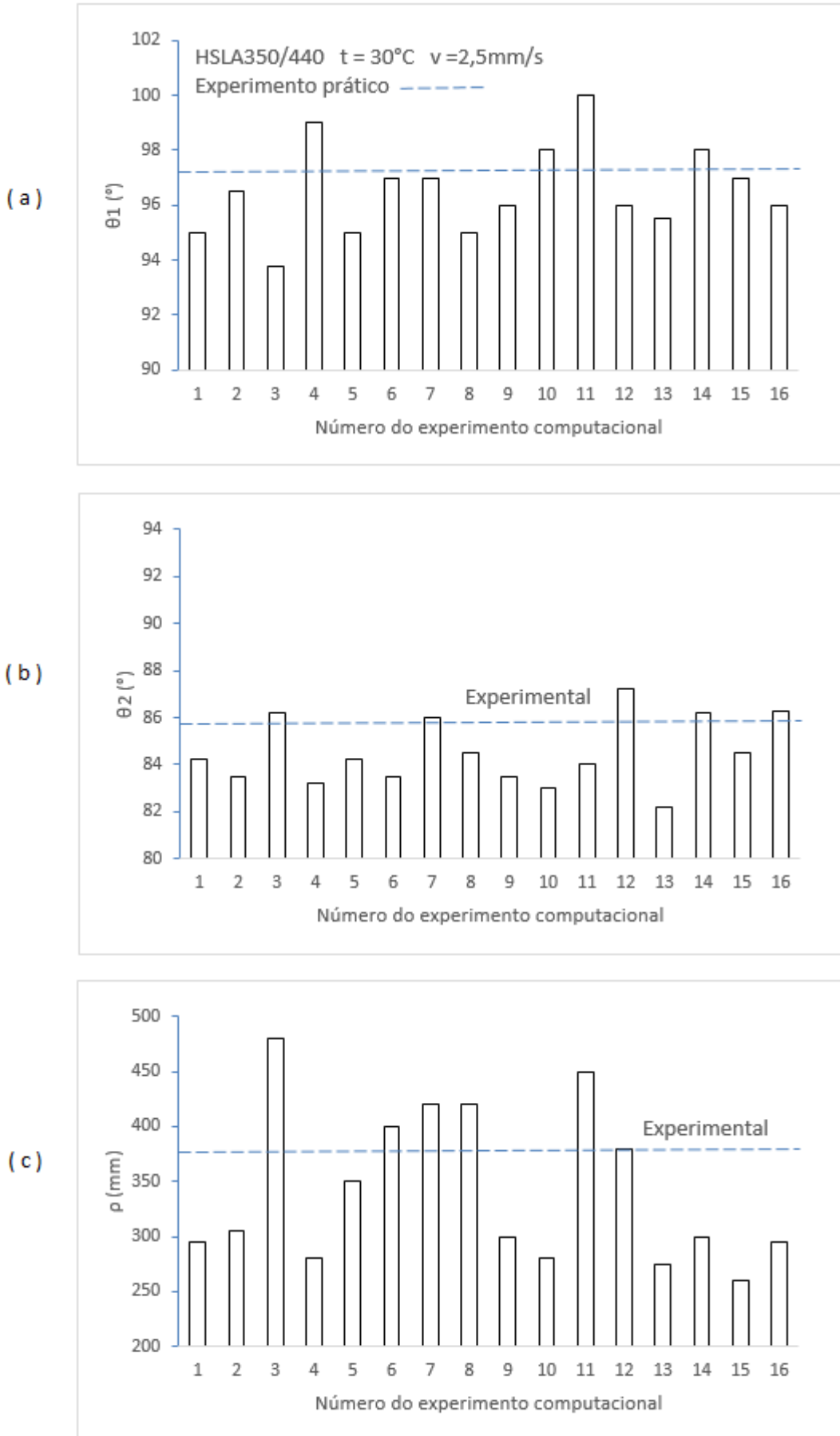
FIGURA 53 – FERRAMENTA DE EMBUTIMENTO NO AMBIENTE COMPUTACIONAL



O modelo computacional foi desenhado com as mesmas dimensões, formas e restrições geométricas da ferramenta utilizada nos ensaios práticos de embutimento.

Em seguida, foi realizada uma série de 16 experimentos computacionais conforme os arranjos previstos na Tabela 9. O objetivo foi de avaliar a influência dos parâmetros computacionais e ajustar o modelo computacional para a previsão do retorno elástico. Para isto, foram consideradas as mesmas variáveis resposta dos experimentos práticos, são elas: (θ_1) - ângulo de parede, (θ_2) - ângulo do flange e (ρ) - raio de curvamento de parede. Os resultados para os experimentos computacionais com o aço HSLA350/440 podem ser observados na Figura 54.

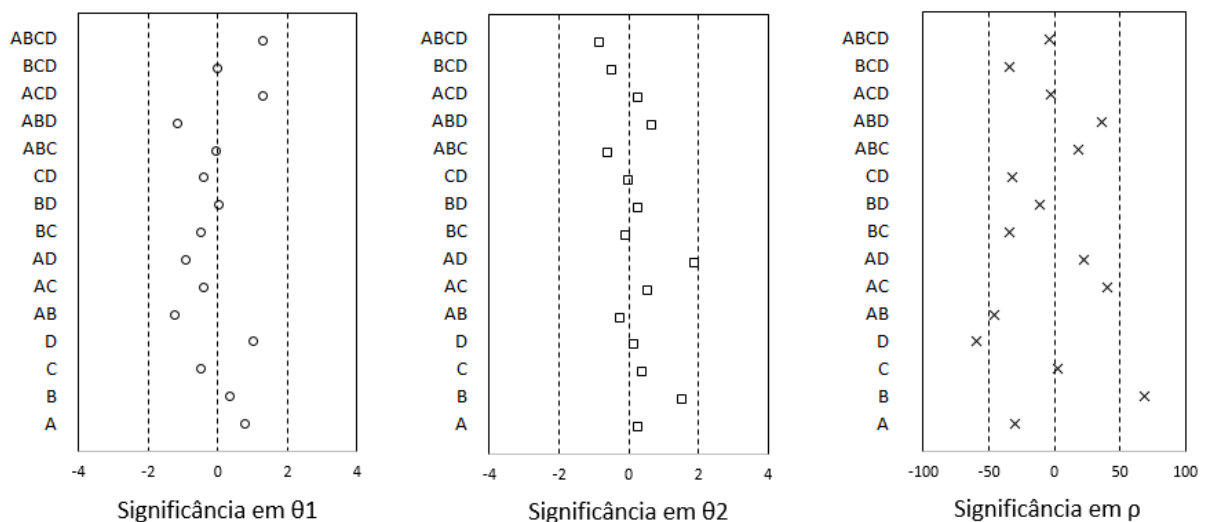
FIGURA 54 – RETORNO ELÁSTICO SIMULAÇÃO HSLA350/440 (A) Θ_1 , (B) Θ_2 E (C) P



A maioria dos resultados dos experimentos computacionais ficou abaixo do experimental prático, indicado pela linha tracejada. Para o ângulo de parede (θ_1) os experimentos 6 e 7 apresentaram o resultado mais próximo do retorno elástico medido nos corpos de prova experimento prático. Para o ângulo do flange (θ_2), o resultado mais próximo foi observado nos experimentos 3, 7 e 14. Para o raio de curvamento de parede (ρ) o experimento 5, 7 e 12.

Os efeitos dos parâmetros de simulação numérica para o aço HSLA350/440 podem ser observados na Figura 55.

FIGURA 55 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO NO HSLA350/440

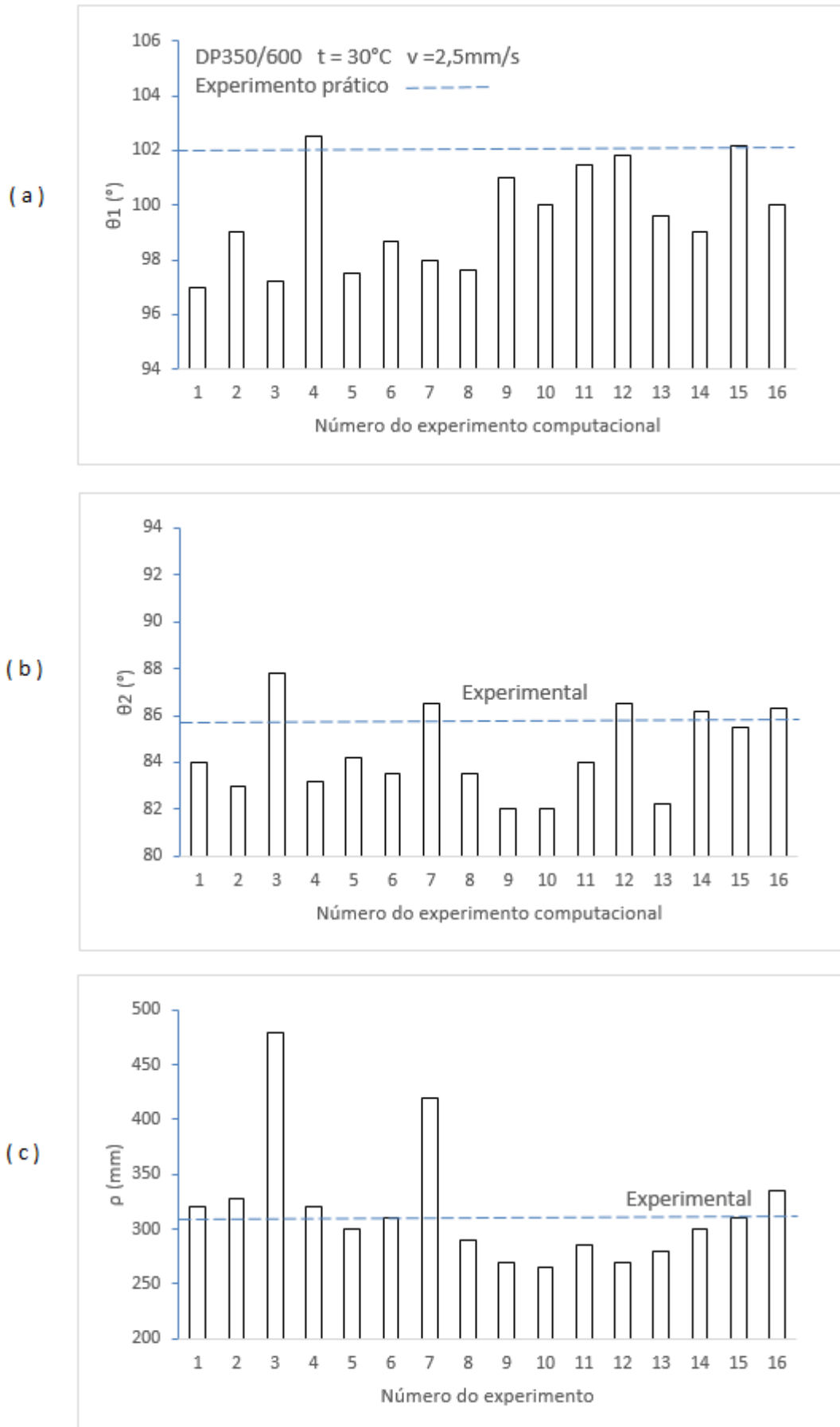


Nesta análise de contraste, considera-se quanto maior o afastamento do zero da escala, maior a significância do efeito.

O ângulo de parede (θ_1) foi mais influenciado diretamente pela quantidade de elementos de contato no raio (D) e pela velocidade do punção (A). Já o ângulo de flange (θ_2) foi mais influenciado pelo coeficiente de atrito (B). Por fim, o raio de curvamento de parede (ρ) foi influenciado pelo coeficiente de atrito (B), quantidade de elementos no raio de contato (D) e também pela velocidade do punção (A).

Portanto, para o aço HSLA350/440, o experimento computacional número 7 (parâmetros $A = 0,1$ $B = 0,144$ $C = 25$ e $D = 5$) se aproximou mais do resultado do experimento prático e por isto foi utilizado para ajustar o modelo computacional para a simulação do embutimento nas outras temperaturas estudadas.

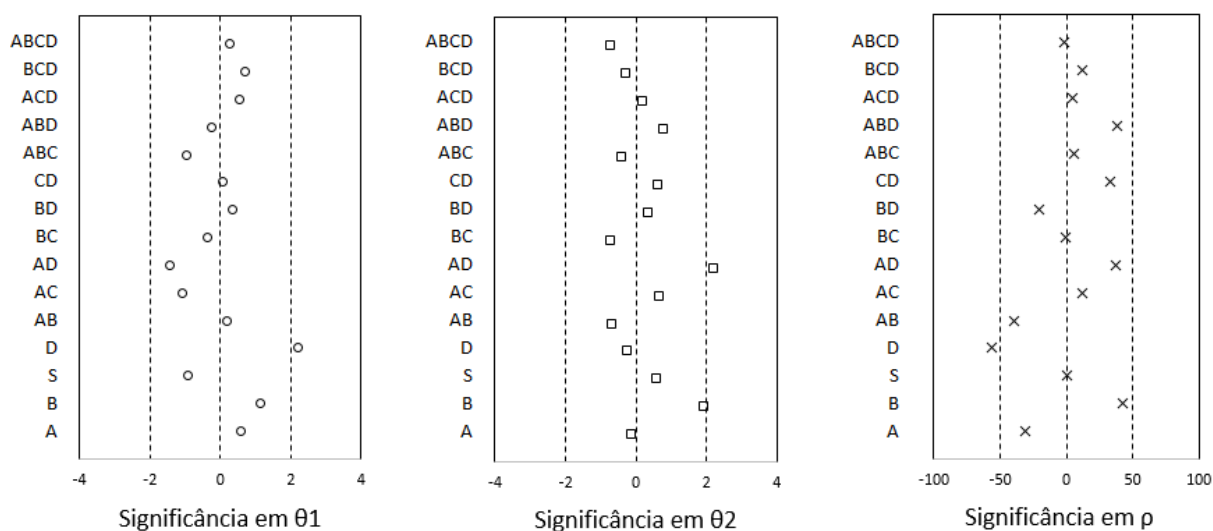
Os resultados para os experimentos computacionais do aço DP350/600 podem ser observados na Figura 56.

FIGURA 56 – RETORNO ELÁSTICO SIMULAÇÃO DP350/600 (A) θ_1 , (B) θ_2 E (C) P

Novamente a maioria dos resultados dos experimentos computacionais ficou abaixo do experimental prático, indicado pela linha tracejada. Para a variável de controle ângulo de parede (θ_1) os experimentos 12 e 15 apresentaram o resultado mais próximo do retorno elástico medido nos corpos de prova experimento prático. Para o ângulo do flange (θ_2), o resultado mais próximo foi observado nos experimentos 14, 15 e 16. Para o raio de curvamento de parede (ρ), o experimento 5, 6 e 15.

Os efeitos dos parâmetros de simulação numérica para o aço DP350/600 podem ser observados na Figura 57.

FIGURA 57 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO NO DP350/600



O ângulo de parede (θ_1) foi mais influenciado diretamente pela quantidade de elementos de contato no raio (D) e pelo coeficiente de atrito (B). Já o ângulo de flange (θ_2) foi mais influenciado pelo coeficiente de atrito (B). Por fim, o raio de curvamento de parede (ρ) foi influenciado pela quantidade de elementos no raio de contato (D), coeficiente de atrito (B), e velocidade do punção (A).

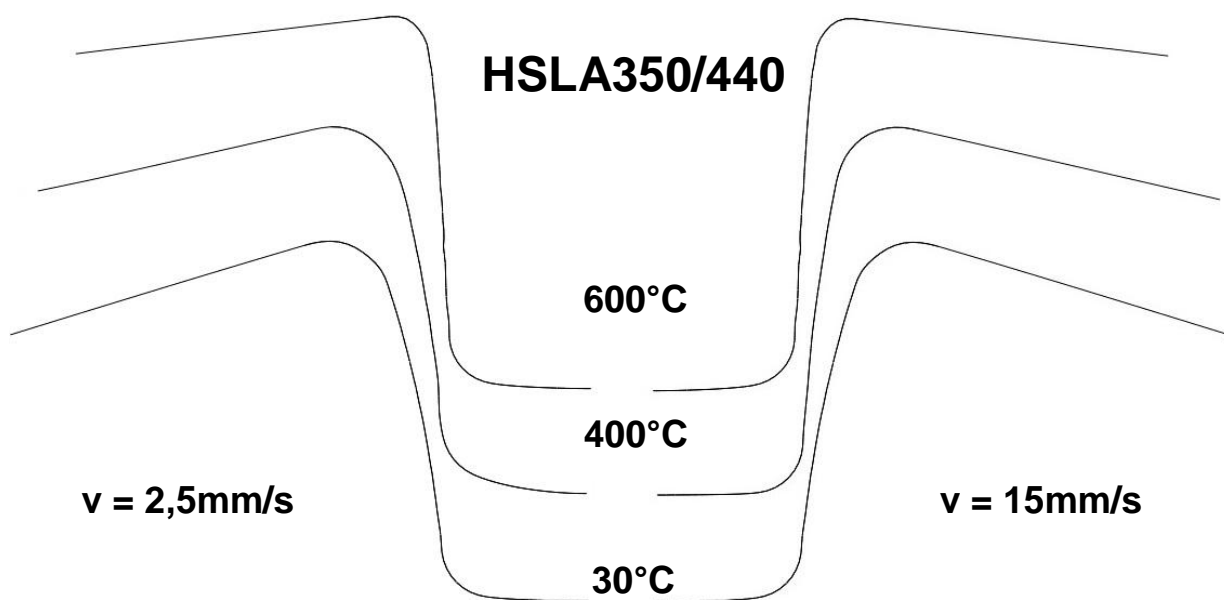
Portanto, para o aço DP350/600, o experimento computacional número 15 (parâmetros A = 0,1 B = 0,144 C = 25 e D = 18) se aproximou mais do resultado do experimento prático e por isto foi utilizado para ajustar o modelo computacional para a simulação do embutimento nas outras temperaturas estudadas.

Os resultados dos experimentos computacionais até aqui apresentados são relativos à temperatura de 30°C e serviram apenas para ajustar o modelo computacional com os melhores parâmetros de simulação, com os materiais descritos a partir dos resultados dos ensaios de tração e dos dados disponíveis na literatura. Neste caso, foram considerados os melhores parâmetros de simulação como sendo aqueles que resultaram no retorno elástico mais próximo do mensurado nos componentes embutidos a partir dos experimentos práticos.

Com o modelo computacional ajustado, os parâmetros de simulação foram fixados e os materiais foram representados pelo modelo de *Hensel-Spittel* nas demais temperaturas e velocidades correspondente aos experimentos práticos.

Na metodologia e planejamento experimental, para efeito comparativo com os experimentos práticos de embutimento, foi prevista a realização de experimentos computacionais de embutimento para as temperaturas 30°C, 400°C e 600°C e para as velocidades de ensaio de $v=2,5\text{mm/s}$ e $v=15\text{mm/s}$. Os resultados obtidos para o aço HSLA350/440 podem ser observados na Figura 58.

FIGURA 58 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS HSLA350/440



O modelo computacional permitiu realizar os experimentos de simulação numérica utilizando as curvas de escoamento geradas a partir do modelo constitutivo de *Hensel-Spittel*. Foi possível observar a redução gradativa do retorno elástico com o aumento da temperatura de ensaio.

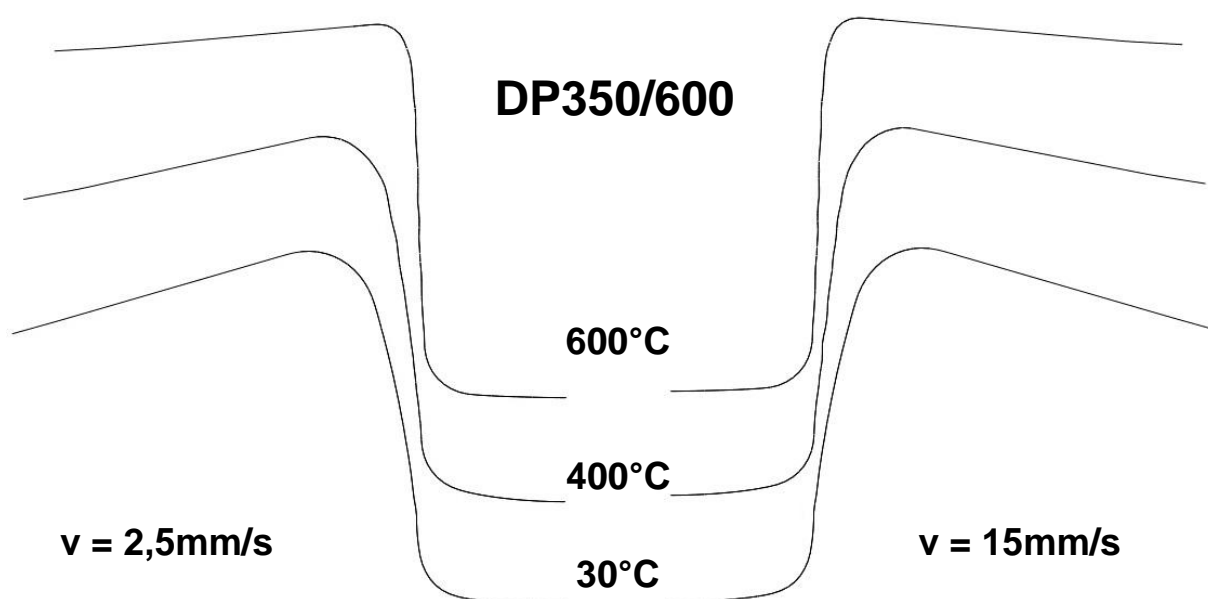
Os valores do retorno elástico obtido nos experimentos computacionais para o aço HSLA350/440 podem ser observados na Tabela 17. Não foram observadas diferenças significativas do retorno elástico comparando as velocidades de ensaio de $v=2,5\text{mm/s}$ e $v=15\text{mm/s}$.

TABELA 17 – RETORNO ELÁSTICO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS - HSLA350/440

Experimento Computacional	Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
1	30	2,5	100,2	350	86,8
2	400	2,5	96,2	740	87,0
3	600	2,5	94,8	1500	87,8
4	30	15	99,8	375	88,0
5	400	15	96,0	750	86,2
6	600	15	94,2	1605	87,5

Os resultados obtidos dos experimentos computacionais para o aço DP350/600 podem ser observados na Figura 59.

FIGURA 59 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS DP350/600



Foi possível observar a redução progressiva do retorno elástico com o aumento da temperatura para os experimentos numéricos realizados para o aço DP350/600.

Os valores do retorno elástico obtido nos experimentos computacionais para o aço DP350/600 podem ser observados na Tabela 18. O modelo computacional não resultou em diferenças significativas do retorno elástico entre as velocidades de ensaio de $v=2,5\text{mm/s}$ e $v=15\text{mm/s}$.

TABELA 18 – RETORNO ELÁSTICO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS - DP350/600

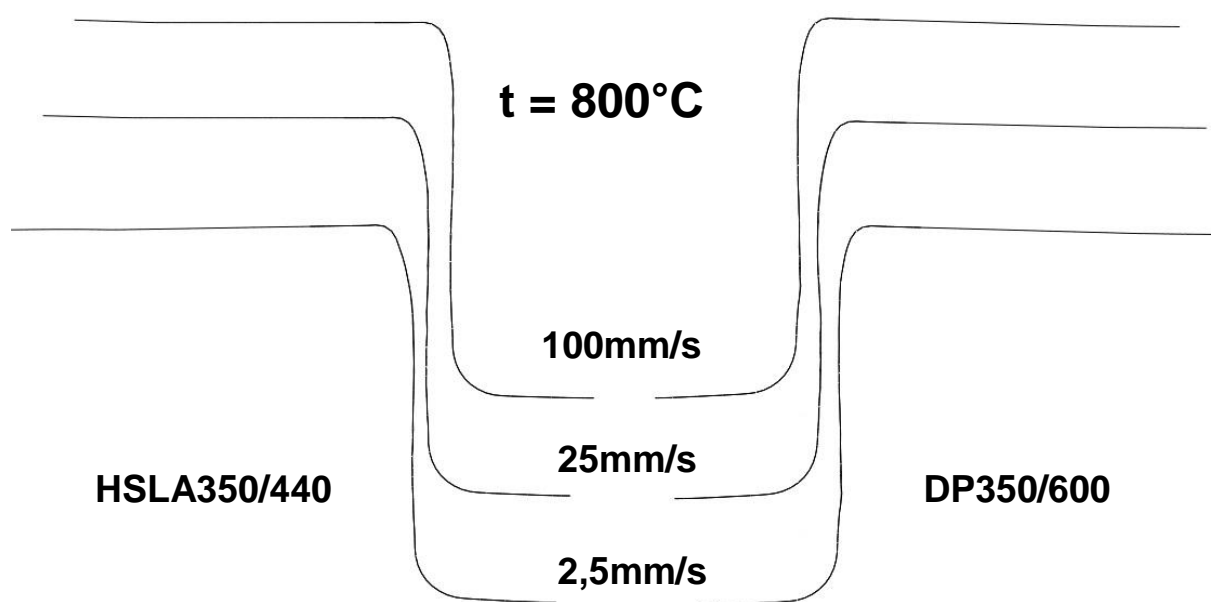
Experimento Computacional	Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
1	30	2,5	102,0	380	86,0
2	400	2,5	101,8	720	87,8
3	600	2,5	95,0	1480	88,4
4	30	15	101,5	390	83,5
5	400	15	99,7	750	86,0
6	600	15	93,0	1695	87,2

Com os resultados obtidos nos experimentos computacionais pode-se dizer que o modelo de *Hensel-Spittel* permitiu simular adequadamente as condições dos experimentos práticos. Este modelo permitiu estimar os valores de tensão e deformação para a simulação numérica dos dois materiais estudados, sendo que os resultados obtidos nos experimentos numéricos podem ser comparados aos obtidos nos experimentos práticos. Desta forma, pode-se afirmar que o modelo de *Hensel-Spittel* com os coeficientes ajustados a partir dos resultados dos ensaios de tração representou de forma adequada os materiais estudados, sobretudo em relação ao retorno elástico. A redução do retorno elástico pode ser associada à redução do módulo aparente que, por sua vez, é dependente da temperatura. Ou seja, o retorno elástico é dependente da temperatura na medida em que o limite de escoamento no material é reduzido com o aumento da temperatura de embutimento. O aquecimento dos materiais estudados resulta na redução do módulo aparente de elasticidade e na antecipação da deformação elástica. Como resultado, de acordo com os resultados

da simulação numérica, o material sofre menor deformação elástica e, portanto, menor retorno elástico, conforme descreve o modelo de *Hensel-Spittel*.

De maneira complementar, foram efetuados experimentos computacionais considerando a temperatura de 800°C e as velocidades de ensaio de $v=2,5\text{mm/s}$, $v=25\text{mm/s}$ e $v=100\text{mm/s}$. Os resultados podem ser observados na Figura 60.

FIGURA 60 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS $T=800^\circ\text{C}$



Os resultados numéricos podem ser vistos na Tabela 19. São complementares, porque os corpos de prova reais foram rompidos durante os experimentos práticos embutimento. Também a prensa utilizada nos experimentos práticos atinge a velocidade máxima de 15mm/s, não permitindo realizar embutimento com a velocidade de 25mm/s e 100mm/s. Foram realizados apenas os experimentos computacionais.

Os resultados do retorno elástico para os ângulos θ_1 e θ_2 foram muito próximos de 90° . Todas as simulações considerando a temperatura de 800°C resultaram em raios de curvamento de parede irregulares e superiores a 1000mm, que podem ser considerados quase-retas. Por outro lado, os experimentos computacionais resultaram em componentes embutidos deformados na região de contato com o raio da matriz e também na região do raio de curvamento de parede. Esta deformação pode ser associada à ação do prensa chapas, que nos

experimentos práticos resultou na ruptura dos corpos de prova. No modelo computacional resultou em peças embutidas com deformação geométrica.

TABELA 19 – RETORNO ELÁSTICO PARA OS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EM $T = 800^{\circ}\text{C}$

Experimento Computacional	Material	Velocidade de punção (mm/s)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
1	HSLA350/440	2,5	90,6	1060	89,9
2	HSLA350/440	25	90,7	1850	90,7
3	HSLA350/440	100	89,8	3250	90,5
4	DP350/600	2,5	92,5	1220	89,8
5	DP350/600	25	91,7	2725	90,6
6	DP350/600	100	91,2	3060	89,2

Para a temperatura de 800°C foi constatado que a menor tensão de escoamento reduz o retorno elástico. Também nesta temperatura, o aumento da taxa de deformação levou ao limite de tensão de ruptura melhorando a conformabilidade dos materiais.

Nos experimentos computacionais não foi reproduzida a ruptura dos corpos de prova observados nos experimentos práticos. Para isto, seria necessário ajustar o modelo computacional com a inclusão de um critério de falha, que pode ser baseado na tensão de ensaio ou na previsão da redução de espessura do componente embutido, sugestão para futuros trabalhos nesta linha de pesquisa.

Portanto, para os experimentos computacionais realizados na temperatura de 800°C , com os dados obtidos a partir do modelo de *Hensel-Spittel*, tanto para o aço HSLA350/440 quanto para o aço DP350/600, pode-se considerar que foi possível prever a supressão do retorno elástico.

4.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS

Os resultados experimentais podem ser comparados aos resultados da simulação numérica. A Tabela 20 contém os valores das variáveis resposta dos experimentos práticos e experimentos computacionais para o aço HSLA350/440.

TABELA 20 – COMPARATIVO PRÁTICO X COMPUTACIONAL - HSLA350/440

Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	Experimentos práticos			Experimentos computacionais		
		θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
30	2,5	97,2	378	85,7	100,2	350	86,8
400	2,5	97,1	538	87,7	96,2	740	87,0
600	2,5	94,7	3381	89,6	94,8	1500	87,8
30	15	97,7	356	84,5	99,8	375	88,0
400	15	93,9	3118	89,4	96,0	750	86,2
600	15	94,8	1973	87,9	94,2	1605	87,5

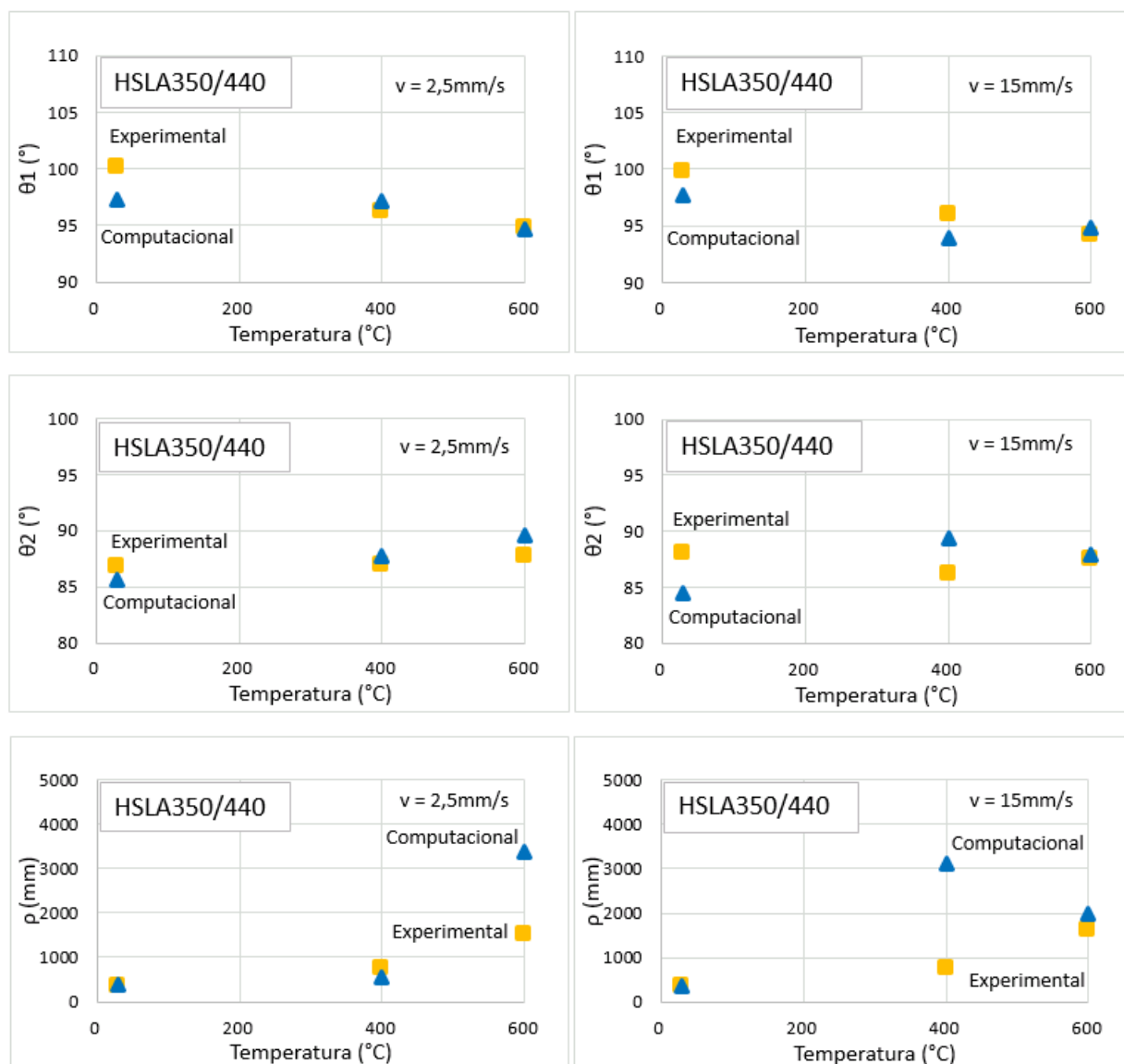
A Tabela 21 contém os valores das variáveis resposta dos experimentos práticos e experimentos computacionais para o aço DP350/600.

TABELA 21 – COMPARATIVO PRÁTICO X COMPUTACIONAL - DP350/600

Temperatura (°C)	Velocidade de punção (mm/s)	Experimentos práticos			Experimentos computacionais		
		θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)	θ_1 (°)	ρ (mm)	θ_2 (°)
30	2,5	102,0	309	85,7	102,0	380	86,0
400	2,5	95,2	4142	89,3	101,8	720	87,8
600	2,5	96,9	654	86,3	95,0	1480	88,4
30	15	102,9	291	83,9	101,5	390	83,5
400	15	97,4	1249	87,2	99,7	750	86,0
600	15	95,6	667	86,4	93,0	1695	87,2

O comparativo do retorno elástico entre os resultados dos experimentos práticos e computacionais para o aço HSLA350/440 também pode ser observado na Figura 61.

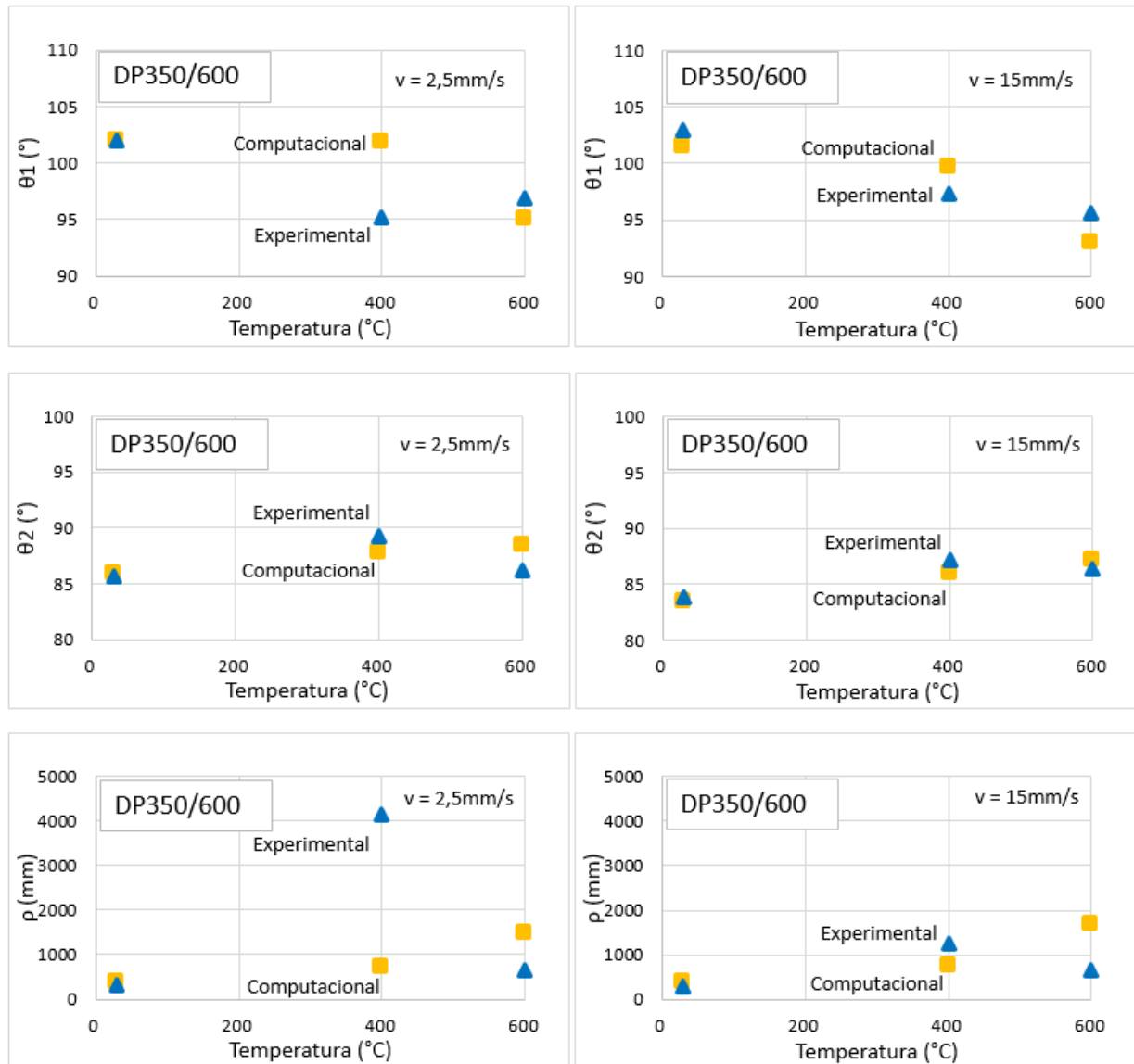
FIGURA 61 – COMPARATIVO DO RETORNO ELÁSTICO NO AÇO HSLA350/440



É possível observar uma convergência dos resultados considerando o ângulo de parede (θ_1) e o ângulo de flange (θ_2). Na medida em que a temperatura aumenta, os valores práticos e computacionais se aproximam. A variação mais significativa ocorre no raio de curvamento da parede, evidenciada pela diferença de valores observada na temperatura de 600°C para a velocidade de ensaio de $v=2,5\text{mm/s}$ e na temperatura de 400°C para a velocidade de ensaio de $v=15\text{mm/s}$.

O comparativo do retorno elástico entre os resultados dos experimentos práticos e computacionais para o aço DP350/600 pode ser observado na Figura 62.

FIGURA 62 – COMPARATIVO DO RETORNO ELÁSTICO NO AÇO DP350/600



É possível observar uma convergência dos resultados considerando o ângulo de parede (θ_1) e o ângulo de flange (θ_2) para a temperatura de 30°C e 600°C. Na temperatura de 30°C esta convergência era esperada pois o modelo computacional teve seus parâmetros ajustados para esta temperatura.

Já para a temperatura de 400°C foi observada uma diferença significativa do retorno elástico comparado no ângulo de parede e no raio de curvamento de parede para a velocidade de $v=2,5 \text{ mm/s}$. Esta diferença foi reduzida considerando os resultados na velocidade de $v=15 \text{ mm/s}$.

Estes resultados permitem a validação do modelo computacional na simulação do embutimento de peças em aços de alta resistência. Para o aço HSLA350/440 o modelo computacional foi mais coerente com os experimentos práticos considerando a velocidade $v=2,5\text{mm/s}$. Para o aço DP350/600 o modelo computacional foi mais coerente considerando a velocidade $v=15\text{mm/s}$.

Conforme foi descrito por Lajarin (2012), e de acordo com o comparativo entre os resultados práticos os resultados computacionais, pode-se confirmar que a elevação da temperatura promove o relaxamento das tensões residuais após o embutimento e auxiliam na redução do retorno elástico.

O raio de curvamento de parede, conforme citado por Wagoner (2013), foi o efeito de retorno elástico que apresentou a maior divergência entre os resultados do modelo computacional comparados com os experimentos práticos. As diferenças encontradas podem ser reduzidas com o ajuste do modelo computacional levando em conta a variação do coeficiente de encruamento proposto por Konieczny (2003) e os efeitos de não linearidade do módulo de elasticidade e do efeito Bauschinger, propostos por Placidi *et al.* (2008).

5 CONCLUSÃO

Com base nos ensaios de tração realizados com controle de temperatura foi possível comprovar algumas características dos aços HSLA350/440 e DP350/600 contidas na literatura. Foram realizados ensaios de tração em diferentes temperaturas, o que permitiu observar a influência da temperatura nos processos de conformação aplicados a estes materiais. Também foram realizados ensaios de tração em diferentes taxas de deformação.

Para a temperatura de 30°C, ambos os materiais apresentaram limite de resistência maiores que os previstos pelo fabricante, fato que pode ser associado à diferença na velocidade dos ensaios de tração. Para a temperatura de 400°C foi observada a redução do limite de resistência e praticamente o mesmo limite de deformação na ruptura. Para a temperatura de 600°C foi observada a ruptura prematura dos corpos de prova, possivelmente devido ao fenômeno de fragilização ao azul, assunto que deve ser melhor investigado em trabalhos futuros.

Para 800°C ambos os materiais apresentaram drástica redução no limite de resistência e ao mesmo tempo aumento no limite de conformação. O limite de deformação na ruptura aumentou com o aumento da taxa de deformação. Isto indica que nas condições apropriadas o retorno elástico deve ser suprimido nesta temperatura.

Pode-se concluir, com base nos resultados, que em geral o aumento da temperatura vai implicar em menores forças aplicadas nos processos de conformação. Também foi possível concluir que o limite de deformação varia com o aumento da temperatura e com a taxa de deformação.

O comportamento dos materiais em função da temperatura e da taxa de deformação foi ajustado ao modelo de *Hensel-Spittel*.

Os experimentos práticos de embutimento possibilitaram a variação da temperatura e da velocidade de ensaio, conforme as definições previstas no planejamento experimental. A medição dos corpos de prova embutidos confirmou a hipótese da redução do retorno elástico com o aumento da temperatura. O menor retorno elástico foi medido nos corpos de prova embutidos a 600°C. Não foi possível embutir os corpos de prova aquecidos a 800°C, porque os mesmos romperam durante os experimentos práticos.

O retorno elástico é dependente da temperatura na medida em que o limite de escoamento no material é reduzido com o aumento da temperatura de embutimento. O aquecimento dos materiais estudados resultou na redução do módulo aparente de elasticidade e na antecipação da deformação plástica. Como resultado, o material sofre menor deformação elástica e, portanto, menor retorno elástico.

Foi criado um modelo computacional com os mesmos parâmetros de processo, parâmetros de ferramenta e temperatura dos experimentos práticos. O modelo foi ajustado com base nos resultados experimentais. A previsão do retorno elástico foi possível através dos dados extrapolados a partir do modelo de *Hensel-Spittel*, que foi considerado adequado para o presente caso.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a análise de resultados e discussões surgiram algumas questões que não puderam ser resolvidas neste trabalho e servem de sugestões para trabalhos futuros:

- Incluir um sistema de aquecimento na ferramenta para evitar o resfriamento prematuro dos corpos de prova durante as operações de embutimento
- Variar a geometria da ferramenta para facilitar o posicionamento dos corpos de prova e que não utilize o prensa chapas com o intuito de facilitar a execução dos experimentos na temperatura de 800°C
- Aprofundar o estudo dos materiais com observações em microscópio de varredura eletrônica no intuito de identificar relações de causa e efeito sobre a temperatura e o retorno elástico sob ponto de vista metalúrgico
- Aprofundar o estudo dos materiais aquecidos na temperatura de 600°C
- Estudar o coeficiente de atrito entre a chapa e a matriz e sua dependência com a temperatura
- Propor um modelo analítico que descreva a operação de embutimento considerando as variações de temperatura do sistema
- Incluir um critério de falha no modelo computacional e aprimorar a simulação numérica

REFERÊNCIAS

ABAQUS, Inc. **ABAQUS Theory Manual**, version 6.14, 2014

ANDERSSON, A. **Numerical and experimental evaluation of springback in a front side Member**. Journal of Materials Processing Technology, v. 169, p. 352–356, 2005.

AKERSTROM, P. **Modeling and simulation of hot stamping**. Tese de doutorado, Lulea University of Technology, Sweden, 2006, 130p

ARCELORMITTAL, **S-In motion: A catalogue of solutions**. Ago/2014. Disponível em: <http://automotive.arcelormittal.com/> Acessado em 13/Ago/2014

ARCELORMITTAL. **Dual phase steels**. Disponível em: <http://automotive.arcelormittal.com/> Acessado em 13/Ago/2014

ARCELORMITTAL. **High strength low alloy (HSLA) steels for cold forming**. Disponível em: <http://automotive.arcelormittal.com/> Acessado em 13/Ago/2014

ASM INTERNATIONAL, **High-strength low-alloy steels**. Alloying: Understanding the Basics, EUA, p. 193-203, 2001

ASGARI, S.A; PEREIRA, M.; ROLFE, B. F.; DINGLE, M.; HODGSON, P.D. **Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis**. Journal of Materials Processing Technology, v. 203, p. 129-136, 2008

BANABIC, D. **Formability of metallic materials**. Berlin, Heidelberg: Springer; 2000.

BARLAT, F.; BANABIC, D.; CAZACU, O. **Anisotropy in sheet metals**. NUMISHEET 2002, p. 515 – 524, Jeju Island, Korea, 2002

BAROUZEH, M.R.; MONDALI, M. **Springback investigation at warm V-bending conditions by numerical and experimental methods**. International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering (ICTMIE'2011), Bangkok, Decvbla, 2011

BATALHA, M.H.F., **Estudo da estampabilidade a quente de aço ao boro em conformação com redução de espessura controlada**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015

BEKAR, D.; ACAR, E.; OZER, F.; GULER, M. A. **Robust springback optimisation of DP600 steels for U-channel forming**. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol III WCE 2011, London, U.K, July 6 - 8, 2011

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I.B.; BATALHA, G.F.; BUTTON, S.T.; **Conformação plástica dos materiais**, Edição Digital, São Paulo, 2011

BURCHITZ, I.A., **Improvement of springback prediction in sheet metal forming**, Tese de doutorado, Universidade de Twente, Holanda, 2008

BURCHITZ, I.A.; MEINDERS, T.; HUETINK, J. **Influence of numerical parameters on springback prediction in sheet metal forming.** Proceedings of the 9th International Conference on Material Forming, ESAFORM 2006, p. 407–410, 2006

BUTTON, S. T.; FLANDOLI, F. **Improvement of mechanical properties and microstructure of 22MnB5 steel by hot stamping and direct cooling.** IDDRG 50th Anniversary Conference, 2010, Graz, Austria, May 31 – June 02, 2010

BUTTON, S. T.; LONGHI, A. **Estampagem a quente de recortes de chapas de aços ao boro soldadas a laser.** 7.º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Brasil, Maio, 2013

CARLEER, B.D.; MEINDERS, T.; PIJLMAN, H.H.; HU'ETINK, J.; VEGTER, H. **A planar anisotropic yield function based on multiaxial stress states in finite elements.** COMPLAS V, 5th International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, Spain, March 17-20, 1997

CHANG Y.; MENG Z.; YING L.; LI X.; MA N.; HU P. **Influence of hot press forming techniques on properties of vehicle high strength steels.** Journal of Iron and Steel Research, International, v. 18(5), p.59-63, 2011

CHEMIN FILHO, R. A. **Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação de pressão no prensa-chapas.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2011, 148p

CHEN, P.; KOÇ, M. **Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels.** Journal of Materials Processing Technology, 190, 2007, p.189–198

CHUN, B.K.; KIM, H.Y.; LEE, J.K. **Modeling the bauschinger effect for sheet metals, part I: theory.** International Journal of Plasticity, v. 18(5-6), p. 571-595, 2002.

CHUNG, K.; LEE, M.G.; KIM, D.; KIM, C.; WENNER, M.L.; BARLAT, F. **Spring-back evaluation of automotive sheets based on kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions Part I: theory and formulation.** International Journal of Plasticity, v.21, p. 861–882, 2005a

CHUNG, K.; LEE, M.G.; KIM, D.; KIM, C.; WENNER, M.L.; WAGONER, R.H. **Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions Part II: characterization of material properties.** International Journal of Plasticity, v.21, p. 883–914, 2005b

CHUNG, K.; KUWABARA, T.; VERMA, R. K.; PARK, T. **BENCHMARK 4 - Pre-strain Effect on Spring-back of 2-D Draw Bending.** NUMISHEET 2011, Seoul, Korea, 2011

COHEN, M.; HANSEN, S. S. **On the fundamentals of HSLA Steels.** Proceedings of an International Conference on HSLA Steels, HSLA'85, Beijing, China, 1985

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008

CRINA, A. **Accuracy of U bent parts made on anisotropic metal sheets**. 13th International Research / Expert Conference, TMT2009, Hammamet, Tunisia, 2009

DONGJUAN Z.; CUI, Z.; RUAN, X.; LI, Y. **An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending**. Computer Material Science, vol. 38, no. 4, pp. 707-715, 2007.

GAN, W.; WAGONER, R.H. **Die design method for sheet springback**. International Journal of Mechanical Science. 46, 2004, p. 1097–1113

GORNI, A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas**. Revista Corte e Conformação de Metais, Dezembro, 2008, p. 26-57

GORNI, A. A. **Novas tendências para o processo de estampagem a quente**. Revista Corte e Conformação de Metais, Junho, 2010, p. 62-77

GOUD, R. R.; PRASAD, K. E.; SINGH, S. K. **Formability limit diagrams of extra-deep-drawing steel at elevated temperatures**. Procedia Materials Science, v. 6, p. 123-128. 2014.

HAKAN, D.; MUSTAFA, O.; MURAT, S. **Effects of material properties and punch tip radius on spring-forward in 90° V bending processes**. Journal of Iron and Steel Research, International. 2013, 20(10): 64-69

HENSEL, A. SPITTEL, T. **Kraft – und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren**, 1st edition, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978.

JEON, Y. J.; SONG, M. J.; KIM, H. K.; CHA, B. S.; **Effect of hot-stamping process conditions on the changes in material strength**. International Journal of Automotive Technology, Vol. 16, No. 4, 2015, p. 619-627

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. **A review on hot stamping**. Journal of Materials Processing Technology. 210, 2010, p.2103–2118

KEELER, S.P. **Application and forming of higher strength steel**. Journal of Materials Processing Technology 46, 1994, p. 443–454

KEELER, S. P. **General techniques to reduce springback**. Metal Forming Magazine, Jun, 2008

KOLLECK, R.; VEIT, R.; HOFMANN, H.; LENZE, F.J. **Alternative heating concepts for hot sheet metal forming**. In: 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Kassel, Germany, 2008, p. 239–246

KUSUMI, K.; NOMURA, N.; MAKI, J. **Formability and FEM simulation of steel sheets in the hot stamping process**. Nippon Steel Technical Report, 113, Japan, May, 2013

KUWABARA, T.; ASANO, Y.; IKEDA, S.; HAYASHI, H. **An evaluation method for springback characteristics of sheet metals based on a stretch bending test**. Proceedings of IDDRG 2004. Forming the Future. Global Trends in Sheet Metal Forming, Sindelfingen, Germany, 2004 p. 55-64

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do modulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2012, 197p

LAURENT, H.; RIO, G.; BLE'S G. **Asynchronous interface between a finite element commercial software ABAQUS and an academic research code HEREZH++**. Advances in Engineering Software, v. 39, p.1010–1022, 2008

LEE, M.G.; KIM, S.J.; HAN, H.N. **Finite element investigations for the role of transformation plasticity on springback in hot press forming process**. Computational Materials Science, 47, p.556–567, 2009

LI, X.; YANG, Y.; WANG, J.; BAO, J.; LI, S. **Effect of the material-hardening mode on the springback simulation accuracy of v-free bending**. Journal of Materials Processing Technology, v. 123(2), p. 209–211, 2002

LIM, H.; LEE, M.G.; SUNG, J.H.; WAGONER, R.H. **Time-dependent springback of advanced high strength steels**. International Journal of Plasticity 29, 2012, p. 42-59

LIU W.; LIU H.; XING Z.; LIU G.; BAO, J. **Effect of tool temperature and punch speed on hot stamping of ultra high strength steel**. Journal of Materials Processing Technology 210, 2010, p. 2103–2118

LUO, L.; GHOSH, A. K. **Elastic and inelastic recovery after plastic deformation of dqs steel sheet**. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, v. 125(3), 2003, p. 237–246

MADI, M.; REBEYKA, C.J.; WOLLNER, N.; MARCONDES, P.; **Avaliação na uniformidade de deformação em chapas do aço DP600 com a variação da velocidade de conformação**. CONEM – IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Brasil, 2016

MAKINOUCHI, A.; NAKAMACHI E.; ONATE, E.; WAGONER R.H. **Experimental analysis of Numisheet'93 square cup bench mark test**. NUMISHEET 1993, Isehara, Japan, 1993

MEINDERS, T.; KONTER, A.W.A.; MEIJERS, S.E.; ATZEMA, E.H.; KAPPERT, H. **A sensitivity analysis on the springback behaviour of the unconstrained bending problem**. International Journal of forming processing v. 9(3), 2006, p. 365–402

MIN, J.; LIN, J.; LI, J.; BAO, W. **Investigation on hot forming limits of high strength steel 22MnB5**. Computational Materials Science 49, 2010, p. 326–332

MINITAB, Inc. **Tutoriais de utilização**, disponível em <http://www.minitab.com/pt-br/support/tutorials/> Acessado em 30/Ago/2104

MONTGOMERY, D. C., **Design and analysis of experiments**, 6. Ed. Hoboken, N.J. J. Wiley, 2005

MORI, K.; MAKI, S.; TANAKA, Y. **Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating**. CIRP Annals- Manufacturing Technology, V. 54, Issue 1, 2005, p. 209-212

NADERI, M., SAEED-AKBARI, A., BLECK, W. **The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel**. Materials Science and Engineering: A, 2008; 487(1-2): p. 445-455

NARAYANASAMY, R.; SATHIYA, C.S. **Some Aspects on Fracture Limit Diagram Developed for Different Steel Sheets**. Materials Science Engineering A, 2006, 417., p.197-224

NIKHARE, C.; MARCONDES, P.V.P.; WEISS, M.; HODGSON, P. D. **Experimental and numerical evaluation of forming and fracture behavior of high strength steel**. New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels: Steel Conference, The Minerals, Metals & Materials Society, Buenos Aires, Argentina, 2008, p. 1-13

OZTURK, F.; TOROS, S.; KILIC, S. **Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures**. Journal of Iron and Steel Research, International. 16(6), 2009, p.41-46

PELLEGRINI, D. **Study on thermal and rheological parameters of high strength steels in hot forming operations**. Tese de Doutorado - Università degli Studi di Padova, Itália, 2011. 109p

PLACIDI F.; VADORI R.; CIMOLIN F.; CAMPANA F. **An efficient approach to springback compensation for ultra high strength steel structural components for the automotive field**, New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels (International conference), Buenos Aires - ARG, 2008

SADAGOPAN, S.; URBAN, D. **Formability characterization of a new generation of high strength steels**. American Iron and Steel Institute, 2003

SANTOS, R.A. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processo de dobramento de aços de alta resistência**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2013, 114p

SILVA, H.C.; LAJARIN, S.F.; MARCONDES, P.V.P. **Analysis of numerically simulated true strain on high stampability sheets**. Journal of Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering, vol.32 no.1, Rio de Janeiro Jan/Mar, 2010

SOUZA, F.B.P. de; **Simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço Usibor1500P**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013, 113p

SOUZA, S.A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2004

TIGRINHO, L. M. V. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2011, 128p

TURRETA, A. **Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of quenchenable high strength steels in hot stamping operations**. Tese de Doutorado - Università degli Studi di Padova, Itália, 2008. 170p

TURRETA, A; BARIANI, P.F.; BRUSCHI, S.; GHIOTTI, S. **Testing formability in the hot stamping of HSS**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 265–268

VERMA, R.K.; HALDAR, A. **Effect of normal anisotropy on springback**. Journal of Materials Processing Technology. 190, 2007, p. 300–304

WAGONER, R.H.; WANG, J.F.; LI, M. **Springback**, Chapter in ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. ASM, Materials Park, OH, p. 733–755, 2006

WAGONER, R.H.; LIM, H.; LEE, M.G. **Advanced Issues in springback**. International Journal of Plasticity, v. 45, p. 3–20, 2013

WANG J. F.; WAGONER R.H.; MATLOCK D.K.; BARLAT F., **Anticlastic curvature in drawbend springback**. International Journal of Solids and Structures, v. 42, p. 1287–1307; 2005

WORLD AUTO STEEL, **Advanced high-strength steels application guidelines version 5.0**, May, 2014. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org/>

XU, W.L.; MA, C.H.; LI, C.H.; FENG, W.J. **Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming**. Journal of Materials Processing Technology, v. 151(1-3), p. 217–222, 2004

YAN, B. **High Strain Rate Behavior of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications**, 2003 Great Designs in Steel, American Iron and Steel Institute (February 19, 2003), www.autosteel.org

YANAGIMOTO, J.; OYAMADA, K. **Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 57, Issue 1, 2005, p. 32 – 324

YOON, J.W.; BARLAT, F.; DICK, R.E.; CHUNG, K.; KANG, T.J. **Plane stress yield function for aluminum alloy sheets - part II: Fe formulation and its implementation**. International Journal of Plasticity, v. 20(3), p. 495–522, 2004